

**Estudio de viabilidad técnica y económica del material de fresado para
aplicaciones en bases de vías nuevas**

Manuel Alejandro Raigozo Rey
Ingeniero Civil

Proyecto de grado
Maestría en Gerencia de Ingeniería
Modalidad: Presencial
Énfasis: Profundización

Asesor tesis:
Carlos Domínguez Paz
Master in Materials Engineering and Nanotechnology



Universidad de
La Sabana

Jurado 1

Jurado 2

Jurado 3

Contenido	
RESUMEN:	1
ABSTRACT	2
1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN:	3
2. MARCO CONCEPTUAL:	5
2.1 MARCO TEÓRICO:.....	5
2.1.1 Fresado:	5
2.1.2 Tipos de escenarios donde se utiliza el fresado como base o subbase	7
2.1.3 Capas granulares:	9
2.2 ESTADO DEL ARTE:	9
3. OBJETIVOS	10
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	10
4. METODOLOGÍA:	11
5. RESULTADOS	13
5.2 ENSAYOS REALIZADOS:	14
5.2.1 Granulometría:.....	14
5.2.2 Desgaste Los Ángeles:	15
5.2.3 Ensayo Micro Deval:	15
5.2.4 Ensayo 10% de finos:	15
5.2.5 Ensayo materia orgánica:	16
5.2.6 Ensayo del límite líquido e índice de plasticidad:.....	17
5.2.7 Ensayo de equivalente de arena:	17
5.2.8 Ensayo de Azul de Metileno:	17
5.2.9 Terrones de arcilla:	18
5.2.10 Partículas fracturadas mecánicamente.....	18
5.2.11: Partículas planas y alargadas:	18
5.2.12 Angularidad del Agregado Fino:	19
5.2.13 CBR% mínimo:	19
5.3 DISEÑO ESTRUCTURA ASFÁLTICA:.....	23
5.4 APUS PARA COMPARACIÓN:.....	28
6. CONCLUSIONES	30

7. RECOMENDACIONES.....	31
8. REFERENCIAS:.....	32

ANEXOS

Contenido

1. RESULTADOS DE ENSAYO.....	34
2. CÁLCULOS TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO:.....	43
3. DISEÑO DE ESTRUCTURA ASFÁLTICA:	46

RESUMEN:

En marzo de 2022, el Gobierno nacional adjudicó el contrato para el mejoramiento de la Autopista Norte, abarcando el mantenimiento y la construcción de los carriles en la ciudad de Bogotá. Este tipo de proyectos generan material como el fresado, que se obtiene de pavimentos desgastados y puede utilizarse en frío o caliente para formar la nueva base de la estructura del pavimento.

El fresado ha sido utilizado en varios proyectos, como la habilitación de la vía La Romelia-El Pollo, que es una vía transitoria al Aeropuerto Internacional Matecaña en Pereira. En Medellín, han innovado con la producción y aplicación de Pavimento Asfáltico Reciclado (RAP), utilizando material de fresado para nuevas vías y logrando una reducción del 25% en la explotación de canteras. Según la secretaria de Infraestructura de Medellín, Natalia Urrego: “Estas mezclas no solo traen beneficios ambientales para la ciudad, sino también económicos”. Por lo tanto, Bogotá podría beneficiarse significativamente del uso de fresado para mejorar el estado de sus vías.

Dada la escasez de recursos económicos en el país, es fundamental buscar alternativas que cumplan con las especificaciones técnicas y sean más económicas. El propósito de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica del fresado para la construcción de nuevas vías y la reparación de las existentes aplicando los ensayos solicitados por el IDU (Instituto de Desarrollo Urbano) en la especificación 510-18, así como el diseño de la estructura asfáltica, a partir de la guía de diseño AASHTO 93, y realizando una comparación de precios a partir de análisis de precios unitarios. El uso de pavimentos asfálticos reciclados es una técnica implementada en países como Holanda, México, España y Estados Unidos. Este método de reciclaje permite un mejor aprovechamiento de los materiales, ofreciendo ventajas sobre el método tradicional que utiliza mezclas bituminosas derivadas del petróleo. Al aplicar asfalto

en caliente, se obtiene ahorro de energía, menor impacto ambiental, reducción de costos y mejoras en las capas de pavimento.

Finalmente, se logró encontrar un equilibrio que beneficia a la empresa, debido a que el material se puede usar como una base granular, la cual permitirá, ahorrar dinero en material granulado, así como, menor impacto ambiental y una mayor eficiencia en la base de la estructura asfáltica.

ABSTRACT

In March 2022, the national government awarded the contract for the improvement of the Autopista Norte, covering the maintenance and construction of lanes in the city of Bogotá. This type of project generates material such as milling, which is obtained from worn pavements and can be used cold or hot to form the new base of the pavement structure.

Milled material has been used in several projects, such as the habilitation of the La Romelia-El Pollo road, which is a transit road to the Matecaña International Airport in Pereira. In Medellín, they have innovated with the production and application of Recycled Asphalt Pavement (RAP), using milled material for new roads and achieving a 25% reduction in quarrying. According to the Secretary of Infrastructure of Medellín, Natalia Urrego: "These mixes not only bring environmental benefits to the city, but also economic ones". Therefore, Bogota could benefit significantly from the use of milling to improve the condition of its roads.

Given the scarcity of economic resources in the country, it is essential to look for alternatives that meet the technical specifications and are more economical. The purpose of this work is to evaluate the technical feasibility of milling for the construction of new roads and the repair of existing ones, applying the laboratories requested by the IDU (Urban Development Institute) in specification 510-18, as well as the design of the asphalt structure, based on the AASHTO 93 design guide, and making a price comparison based on unit price analysis.

The use of recycled asphalt pavements is a technique implemented in countries such as the Netherlands, Mexico, Spain and the United States. This recycling method

allows a better use of materials, offering advantages over the traditional method that uses bituminous mixtures derived from petroleum. The application of hot asphalt results in energy savings, lower environmental impact, reduced costs and improved pavement layers.

Finally, a balance was found that benefits the company, since the material can be used as a granular base, which will save money in granular material, as well as less environmental impact and greater efficiency in the base of the asphalt structure.

1. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN:

Los distintos materiales que conforman una estructura de pavimento a lo largo del tiempo van exhibiendo vulnerabilidades frente a la deformación, debido a la influencia prolongada de cargas de tráfico, contracciones térmicas y condiciones climáticas adversas que junto con la infiltración de agua conducen a la formación de grietas y baches en las superficies pavimentadas, comprometiendo así su integridad y funcionalidad, aceleran su deterioro y debilitan la infraestructura subyacente. Razón por la cual se deben estar realizando constantes tareas de mantenimiento en proyectos de vías, siendo una de las más comunes la actividad de fresado que consiste en levantar la carpeta asfáltica que se encuentra deteriorada para así poder limpiar la zona y aplicar nuevamente material asfáltico y rehabilitar la vía, no obstante, como producto de dicha actividad se obtienen grandes cantidades de material residual en obra que no cuenta con un uso específico.

En adición a lo expuesto anteriormente, se analiza también el siguiente problema común todo el sector de construcción de infraestructura vial, y es la constante producción de bases granulares convencionales, es decir, de bases de estructuras de pavimento a partir de material natural, esto ya que es una actividad que acarrea problemas ambientales de alto impacto en los recursos naturales, el consumo energético, la generación de residuos, la escorrentía de contaminantes y la alteración del ciclo hidrológico.

En este contexto y en búsqueda de brindar solución a ambas problemáticas el uso de material de fresado para nuevas bases o reparaciones existentes emerge como una alternativa viable, ofreciendo ventajas económicas y reduciendo el impacto ambiental comparado con métodos tradicionales. Además, es importante tener en cuenta que aumento en el volumen vehicular y los cambios climáticos han vuelto obsoleta la red vial existente, pues las deformaciones y esfuerzos actuales superan las especificaciones originales de diseño (Rondón y Lizcano, 2015). Esto impide una movilización eficiente de personas y cargas.

El Consorcio Constructor Sabana Norte (CCSN) enfrentó la necesidad de realizar un mantenimiento prioritario en la Autopista Norte y la Carrera Séptima en Bogotá, empleando grandes cantidades de asfalto convencional y generando aproximadamente 4000 m³ de material de fresado sobrante. Hasta ahora, este material no ha sido reutilizado y se ha almacenado en el campamento, ocupando espacio valioso y representando un costo económico sin retorno.

Este estudio busca evaluar la viabilidad técnica de reutilizar el material de fresado y, en función de los resultados, desarrollar un análisis comparativo entre el uso de un material granular convencional versus el material de fresado que se tiene disponible. Este enfoque no solo podría generar ingresos para cubrir diversos gastos operativos, sino también ofrecer una solución sostenible y eficiente. Además, se discutirán los beneficios ambientales del asfalto reciclado y se verificará su cumplimiento con las normativas vigentes en términos de durabilidad, impermeabilización, adhesión y cohesión.

A la luz de estas consideraciones, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué consideraciones técnicas y económicas se deben tener en el fresado para su reutilización en una base de pavimentos para así considerar viable su reciclaje?

A partir de esta pregunta, se desarrollará la investigación correspondiente para poder encontrar la respuesta a esto.

2. MARCO CONCEPTUAL:

2.1 MARCO TEÓRICO:

2.1.1 Fresado:

El fresado asfáltico, es un proceso que se utiliza en la construcción y en el mantenimiento de vías. Este proceso consiste en remover la capa superficial del asfalto de una superficie que ya se encuentre pavimentada utilizando una máquina fresadora especializada como la que se muestra a continuación:

Figura 1.

Máquina fresadora para pavimento



Nota: Tomado de: *Fresadora de Pavimento PM200: Ferreyros:*

Construproductos. @Construproductos. (n.d.).

<https://construproductos.com/producto/fresadora-de-pavimento-pm200-zDkIU>

Tipos de Fresados:

Se definen tres tipos de fresado a continuación:

- Fresado superficial: Utilizado para corregir problemas superficiales. Este método no aporta mejoras estructurales a los pavimentos.
- Fresado poco profundo: Aplicado principalmente para espesores menores en las capas asfálticas, permite realizar reparaciones superficiales, aunque no contribuye estructuralmente a los pavimentos.
- Fresado de profundidad total: Este es el único método que contribuye estructuralmente al pavimento, ya que alcanza la base o la subbase.

Usos del Fresado Asfáltico:

El fresado asfáltico se utiliza en diversas situaciones, tales como:

- Reparación y mantenimiento de vías: Método empleado para eliminar capas dañadas o desgastadas del asfalto, restaurar la superficie de la vía y mejorar su calidad y seguridad.
- Modificación de la superficie: Se aplica para fresar capas delgadas de asfalto y corregir problemas como el drenaje y la nivelación, entre otras irregularidades de la superficie vial.
- Preparación para repavimentación: Antes de aplicar una nueva capa asfáltica, se fresan las capas existentes para mejorar la adherencia y la calidad de la nueva capa.
- Fresado para uso de bases granulares: Este método consiste en reciclar el material fresado y aplicarlo como base granular, reduciendo costos, desperdicios y tiempos de interrupción del tráfico.

Tipos de Escenarios donde se Utiliza el Fresado como Base o Subbase:

- Rehabilitación de pavimentos: Cuando un pavimento instalado presenta desgaste o daños, pero la base granular sigue en condiciones aceptables, se decide fresar la capa superior y reforzar la base con el material recién fresado, mejorando así la resistencia y estabilidad del nuevo pavimento que se instalará.

- Incremento del espesor estructural: Se fresa el pavimento existente y se refuerza la base con el material de fresado para aumentar el espesor estructural del pavimento y mejorar sus capacidades de carga y durabilidad.
- Mejora de la superficie de rodadura: El fresado ayuda a nivelar las irregularidades y eliminar baches, mejorando la superficie de rodadura. Sin embargo, según la especificación técnica “PARCHEO CON MATERIAL DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO – MBR” del IDU, el máximo de parcheo que se puede trabajar con material de fresado es de 1.5 m x 1.5 m, descartando el fresado para parcheo de mayores dimensiones.
- Reciclaje de materiales: Al fresar un pavimento existente, se reduce la necesidad de nuevos materiales, ayudando así a disminuir costos y desperdicios.

Usos:

El fresado asfáltico se ejecuta en diferentes situaciones como lo son:

- Reparación y mantenimiento de una vía: Este método se usa para eliminar capas dañadas, con grietas o desgastados el asfalto, restaurar la superficie de la vía y mejorar la calidad y seguridad de esta.
- Modificación de la superficie: Este método se aplica cuando se necesario fresar capas delgadas de asfalto, y así poder corregir problemas de drenaje, nivelación u otras irregularidades que pueda presentar la superficie de la vía.
- Preparación para repavimentación: Antes de empezar a aplicar una nueva asfáltica, se suele fresar la capa existente y así poder mejorar la adherencia y la calidad de la nueva capa.
- Fresado para uso de bases granulares: Este método consiste en reciclar este material, y aplicarlo como una base granular así reduciendo costos, desperdicios y tiempos de interrupción de tráfico.

2.1.2 Tipos de escenarios donde se utiliza el fresado como base o subbase

- Rehabilitación de pavimentos: Cuando un pavimento ya instalado presenta desgaste, grietas o dañado más, pero la base granular sigue en condiciones aceptables se decide fresar la capa superior y se refuerza la base con el

material recién fresado. Mejorando así la resistencia y estabilidad del pavimento nuevo que se instalará.

- Incremento del espesor estructural: Cuando es necesario aumentar el espesor estructural del pavimento para así mejorar sus capacidades de carga o durabilidad, se fresa el pavimento existente y se refuerza la base con el material de fresado.
- Mejora de la superficie de rodadura: En muchas ocasiones, el fresado permite ayudar a nivelar las irregularidades y eliminar baches, lo que permite mejorar la superficie de rodadura que se tiene. Sin embargo, en la especificación técnica particular: “PARCHEO CON MATERIAL DE PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO – MBR” del IDU, se solicita que el máximo de parcheo que se puede trabajar con material de fresado es de 1.5 m x 1.5 m, descartando así el fresado para parcheo de mayores dimensiones.
- Reciclaje de materiales: Al fresar un pavimento ya existente, se reduce la necesidad de nuevos materiales ayudando así al costo y al desperdicio.

Figura 2.

Proceso de Fresado in situ.



Fuente: Propia

2.1.3 Capas granulares:

Capas que consisten en material de cantera que cumple con ciertas propiedades físicas, químicas y mecánicas, y que formarán la base y la subbase de la estructura del pavimento.

2.2 ESTADO DEL ARTE:

El uso de asfalto reciclado es una práctica que se ha llevado a cabo durante varios años, y se han realizado diversos ensayos y pruebas para demostrar la eficiencia y eficacia de esta metodología. Un ejemplo destacado es el estudio realizado por Mousa A et al., (2021) en "Evaluation of reclaimed asphalt pavement as base/subbase material in Egypt". Este estudio mostró cómo la aplicación del RAP (pavimento asfáltico reciclado) se ha convertido en una práctica común en la construcción de vías como sustituto del agregado natural, investigando propiedades como el módulo resiliente, la resistencia al corte y la conductividad hidráulica del material.

Por otro lado, en el estudio "Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as an Unbound Base Course Material: A Mechanistic Design Approach Based on Multi-stage Repeated Load Triaxial Tests" de Saad Ullah, Burak F. Tanyu, y otros (2022), se caracterizó el fresado asfáltico y el agregado virgen para su uso como base. Las estructuras asfálticas diseñadas a partir de estas caracterizaciones fueron sometidas a pruebas de esfuerzo para observar el comportamiento de cada diseño, revelando que, en varias ocasiones, los diseños con fresado asfáltico superaron a los de agregado virgen.

Asimismo, una investigación realizada por Ben Mois, Cedric Beck, y otros (2023) indicó que "el pavimento reciclado muestra una resistencia satisfactoria a la fatiga, pero muy poca tolerancia a las fisuras", lo que sugiere que el pavimento reciclado es una mejor opción como base o subbase que como capa principal del asfalto.

En Irán, una investigación en ensayo verificó el uso del pavimento reciclado asfáltico (RAP o MBR) para autopistas. Como mencionan Sasidharan D, Toshikhani A, Gottumukkala B, y otros (2023), se realizaron pruebas de módulo dinámico y

relajación para evaluar cómo actúa el RAP sin aditivos, así como el estrés generado por la carga axial, el volumen de tráfico y la velocidad de los vehículos. Además, se estudiaron el impacto de la temperatura, la viscoelasticidad y la energía disipadora viscosa para verificar el uso de mezclas bituminosas en capas de asfalto de alta velocidad.

Como se ha mencionado, el uso de pavimento reciclado también busca mitigar el daño ambiental generado por el pavimento convencional. Un ensayo realizado por Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., y Zhang, L., mostró que "la construcción con mezcla asfáltica reciclada es la más amigable con el medio ambiente, generando solo 238.74 toneladas métricas de CO₂ por kilómetro".

Un caso de éxito notable es el del Whitsunday Coast Airport (WCA) en Australia, construido en los años 1950, donde se logró un ahorro del 78% en costos comparado con los diseños tradicionales, una reducción del 12% en costos sociales y un ahorro del 33% en impacto ambiental (Greg White, Helen Fairweather, et al., 2018).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica y económica del material de fresado para pavimentos flexibles.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Evaluación de la Resistencia y Durabilidad: Llevar a cabo el 100 % de pruebas de ensayo y pruebas de campo destinadas a evaluar la resistencia y durabilidad del material de fresado, para determinar su aptitud para aplicaciones en pavimentación.
2. Análisis de Propiedades Físicas y Mecánicas: Elaborar un diseño de estructura de pavimento bajo condiciones reales de la zona viabilizando el uso del material de fresado en obras nuevas de infraestructura vial.

3. Estudio Comparativo de Costos: Realizar un análisis comparativo entre los costos de una estructura de pavimento que utiliza material natural como base y una que utiliza material de fresado como base, para así poder determinar si es viable usar el material de fresado.

Tabla 1.

Objetivos específicos y actividades por realizar

Objetivos específicos	Actividades
Evaluación de la Resistencia y Durabilidad: Llevar a cabo el 100 % de pruebas de ensayo y pruebas de campo destinadas a evaluar la resistencia y durabilidad del material de fresado, para determinar su aptitud para aplicaciones en pavimentación.	Revisar la literatura sobre normas y ensayos para este tipo de material. Realizar ensayos pertinentes, siguiendo la especificación IDU.
Análisis de Propiedades Físicas y Mecánicas: Elaborar un diseño de estructura de pavimento bajo condiciones reales de la zona viabilizando el uso del material de fresado en obras nuevas de infraestructura vial.	Revisar guía de diseño AASHTO y crear el diseño de estructura de pavimento asfáltico.
Estudio Comparativo de Costos: Realizar un análisis comparativo entre los costos de una estructura de pavimento que utiliza material natural como base y una que utiliza material de fresado como base, para así poder determinar si es viable usar el material de fresado.	Consultar el costo de transporte, instalación y alistamiento de diferentes bases en comparación al material a trabajar.

Fuente: Propia

4. METODOLOGÍA:

De acuerdo con los objetivos y actividades propuestos, a continuación, se describe la metodología que se empleará para realizar cada una de las actividades:

4.1 REALIZAR LOS ENSAYOS SOLICITADOS PARA EVALUAR SI EL MATERIAL DE FRESADO CUMPLE CON LA ESPECIFICACIÓN IDU 510-18.

Se revisó la especificación IDU 510-18, que requiere la realización de 15 ensayos para verificar el cumplimiento del material con los estándares establecidos. A partir de esta revisión, hubo que consultar las normas INVIAS para realizar correctamente los ensayos. Posteriormente, se planificaron las pruebas en la Universidad de La Sabana. Sin embargo, tras consultar con los responsables, se informó de que no se podían realizar todos los experimentos en dicha universidad por falta de ciertos equipos. Por esta razón, algunos de los resultados fueron proporcionados por el Consorcio Constructor Sabana Norte.

4.2 REALIZAR UN DISEÑO DE ESTRUCTURA DE PAVIMENTO ASFÁLTICO, PARA ASÍ VERIFICAR SI ES VIABLE USAR EL MATERIAL DE FRESADO COMO BASE.

Para verificar la viabilidad del material de fresado como base, se realizó un estudio conforme a la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93 para pavimentos flexibles, esta guía es tomada en cuenta debido a que es la que solicita el IDU para el diseño de estructuras de pavimento en Bogotá. Este estudio incluyó la determinación de las variables de diseño y la verificación de los espesores necesarios para emplear el material de fresado como base.

4.3 REALIZAR UN ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DEL MATERIAL DE FRESADO EN COMPARACIÓN CON OTROS MATERIALES UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE VÍAS, PARA IDENTIFICAR SU POTENCIAL PARA REDUCIR LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN.

Se llevó a cabo un análisis comparativo con diversos tipos de bases granulares, examinando sus costos y los incluidos en los análisis de precios unitarios (APUs). El objetivo fue determinar si el uso del material de fresado representa un ahorro

significativo en comparación con el uso de bases convencionales y evaluar su optimización en términos de costos de producción.

5. RESULTADOS

5.1 REALIZAR LOS ENSAYOS SOLICITADOS PARA EVALUAR SI EL MATERIAL DE FRESADO CUMPLE CON LA ESPECIFICACIÓN IDU 510-18.

Siguiendo la especificación IDU 514-18 “Base y subbase granular para vías vehiculares, peatonales y ciclorrutas con MBR”, se evidenció que los ensayos requeridos se dirijan a la Especificación 510-18 “Base y subbase granular para vías vehiculares” donde se deben cumplir los siguientes parámetros:

Figura 3.

Categorías de Tránsito IDU.

Tipo de Capa	Categorías de Tránsito		
	T1	T2	T3
Pavimento de concreto Asfáltico			
Base Granular	BG-B	BG-A	BG-A
Subbase Granular	SBG-B	SBG-A	SBG-A
Pavimento Concreto Hidráulico			
Base Granular	BG-A	NA	NA

Nota: Tomado de (IDU, 2019, p. 3) Especificación IDU 510-18 “Base y subbase granular para vías vehiculares

En este caso, por el tipo de tránsito, debido al constante movimiento de vehículos en la autopista norte y carrera 7ma en Bogotá, se debe considerar que es una categoría de tránsito tipo 3 este tipo de tránsito se escoge a partir del TPD (Transito Promedio Diario) y la distribución vehicular de la zona, que se puede observar en el Tabla 16 y la Ilustración 3 del anexo. Debido a que es un tránsito tipo 3 el fresado debe cumplir para una base tipo BG-A y/o una subbase SBG-A.

Teniendo en cuenta esto, se deben realizar los siguientes ensayos:

Tabla 510. 2
Requisitos de los agregados para bases granulares

Ensayo		Norma de Ensayo	Clase	
			BG-B	BG-A
Dureza				
Desgaste Los Ángeles	- En seco, 500 revoluciones, % máximo	INV E 218-13	40	35
Micro Deval, % máximo	- Agregado Grueso	INV E 238-13	30	25
10% de finos	- Valor en seco, kN mínimo	INV E 224-13	60	100
	- Relación húmedo/seco, % mínimo		75	75
Limpieza				
Contenido de materia orgánica, % máximo		INV E 121 -13	0	0
Límite Líquido, % máximo		INV E 125 -13	25	25
Índice de Plasticidad, % máximo		INV E 126-13	3	No plástico
Equivalente de Arena, % mínimo (Nota 1)		INV E 133-13	30	30
Valor de Azul de Metileno, máximo		INV E 235-13	10	10
Terrones de arcilla y partículas deleznales, % máximo		INV E 211-13	2	2
Geometría de las Partículas				
Partículas Fracturadas Mecánicamente, % mínimo	- 1 cara	INV E 227-13	60	100
	- 2 caras		40	70
Partículas planas y alargadas (relación 1:3), % máximo		INV E 240-13	20	20
Angularidad del Agregado Fino, % mínimo		INV E 239-13	35	35

El Consorcio Constructor Sabana Norte permitió que se participe de los ensayos realizados con base en los resultados obtenidos. Para tener una segunda corroboración de los datos, se realizaron los ensayos: Desgaste de Los Ángeles, 10% de finos, Límite líquido, Índice de plasticidad, Equivalente de arena, Partículas fragmentadas, y Granulometría en la Universidad de La Sabana.

5.2 ENSAYOS REALIZADOS:

Todos los resultados se presentan en el anexo.

5.2.1 Granulometría:

La granulometría permite estudiar y conocer el tamaño de las partículas y sedimentos presentes en una muestra, para así medir la importancia que tendrán según la fracción de suelo que representen. Este análisis se realiza por tamizado

o por sedimentación cuando el tamaño de las partículas es muy pequeño. (Cotecno, n.d).

Los resultados obtenidos en la granulometría realizada cumplieron con lo solicitado por la especificación IDU 510-18.

5.2.2 Desgaste Los Ángeles:

Este método se utiliza para determinar la resistencia al desgaste superficial de los granos de agregados cuando son sometidos a fricción con el objetivo de medir la capacidad del agregado para no romperse, desintegrarse y desintegrarse bajo el efecto del tráfico (Stratura, 2022).

Los resultados obtenidos en el desgaste de Los Ángeles fueron de 33.16% cumpliendo con los dos tipos de bases que tiene la especificación IDU 510-18.

5.2.3 Ensayo Micro Deval:

Este ensayo nos permite obtener una medida de la durabilidad y de la resistencia a la abrasión de los agregados como resultado de la combinación de acciones que incluyen abrasión y desgaste con esferas de acero en presencia de agua. (Campagnoli, 2007).

Este método de ensayo, no se pudo realizar en las instalaciones de la Universidad de La Sabana, debido a que no se presentaba el equipo necesario, sin embargo, se tomarán los datos obtenidos de cuatro ensayos de 10 ensayos cada uno, realizados en conjunto con el CCSN.

Teniendo, así como resultado promedio 18.8%, en todos los ensayos, el fresado utilizado para las pruebas cumplen con la especificación IDU 510-18 que solicita un % máximo de 35.

5.2.4 Ensayo 10% de finos:

Este ensayo busca evaluar el comportamiento de un agregado pétreo cuando se somete a degradación mecánica (Invias, 2012), donde la especificación solicita que el valor mínimo en seco (kN) sea mínimo de 100 y el % mínimo de 75, en este caso se realizaron 12 pruebas. Para el ensayo realizado, se obtuvo un promedio de 86%, cumpliendo lo especificado por lo solicitado en la especificación IDU 510-18.

5.2.5 Ensayo materia orgánica:

Para que se pueda usar el material de fresado es necesario realizar los ensayos de limpieza, empezando por el de contenido de materia orgánica, que es un ensayo que se basa en la calcinación a elevadas temperaturas de compuestos orgánicos, dentro de la composición volumétrica del material (Universidad Distrital Francisco José Caldas, 2017).

El porcentaje de materia orgánica se obtiene a partir de la fórmula:

$$\% \text{ Materia Orgánica} = \frac{A - B}{A - C} \times 100$$

Se obtuvo para esta prueba un valor del 7.9% y la especificación solicita 0% lo que daría a entender que el material está contaminado, no obstante, se explica el porqué de este resultado. Al realizar el ensayo de materia orgánica, la muestra se calienta, generando así que el asfalto se calcine y haya una variación en el peso de la muestra, lo que hace entender que hay materia orgánica en la muestra, y la razón de esto, es que la prueba considera que cuando un material es calcinado, y el peso varía, el material orgánico se incineró completamente. Pero esto no significa que el material se encuentre contaminado, debido a que hay diferentes factores los cuales influyen a este ensayo, empezando porque al calentar al material a 445°C, el asfalto, y materiales minales como lo son la calcita y las arcillas empiecen a calcinarse, así como también hay que tener en cuenta que los agregados que se encuentran en la sabana de Bogotá son altamente absorbentes, reteniendo así agua en los microporos, lo que hace que el peso se afecte al momento de la calcinación.

También es importante tener en cuenta que, al consultarse con diferentes especialistas de ensayos y personal que trabaja en el IDU (Instituto de Desarrollo a Urbano) se comentó que, este ensayo no es excluyente debido a que la especificación solicita un resultado difícil de conseguir en un RAP (Pavimento reciclado asfáltico).

Sin embargo, es importante aclarar que, también el personal del IDU comentó que para suplir este ensayo y poder tener un resultado, se puede realizar el

ensayo de contenido de materia orgánica por el método de permanganato de potasio regido por la norma UNE 103204:2019. El cual consiste en añadir el material de fresado después de hacer un corte granulométrico a 2mm al permanganato de potasio, y si este tiene una variación en la colorimetría, el material se encuentra contaminado.

A diferencia del primer ensayo de contenido de material orgánico realizado, este se diferencia en que no se ejecuta por ignición, lo que permite que los maltenos del asfalto no sean calcinados y se pueda medir de una manera diferente.

Al realizar este ensayo se tuvo un porcentaje del 0%, lo que indica que está dentro de lo establecido por la especificación.

5.2.6 Ensayo del límite líquido e índice de plasticidad:

Este ensayo busca encontrar el contenido de humedad del suelo, en este caso el material, expresado en porcentaje, cuando se halla el límite entre los estados líquido y plástico. Para el caso de material no presenta límite líquido ni índice de plasticidad, estando así dentro de los límites solicitados por la especificación IDU 510-18.

5.2.7 Ensayo de equivalente de arena:

En este ensayo se busca encontrar la proporción de partículas gruesas y finas en un suelo, también conocido como distribución granulométrica (Ingeniería Real, 2016).

Para poder obtener el equivalente de arena, se utilizó la fórmula a continuación:

$$\text{Equivalente de arena} = \frac{\text{Lectura de Arena}}{\text{Lectura de Arcilla}} \times 100$$

El resultado obtenido a partir de la fórmula fue del 87%, estando en el parámetro donde lo solicitado es de mínimo 30%, por la especificación IDU 510-18.

5.2.8 Ensayo de Azul de Metileno:

Continuando con los requisitos solicitados en la especificación se procedió a realizar el ensayo de Valor de Azul de Metileno, este ensayo busca añadir de manera sucesiva pequeñas dosis de solución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua. Después, se comprueba la

absorción de la solución a través de un papel filtro y se calcula el valor de azul de metileno expresado en gramos de colorantes por kilogramo de fracción granulométrica ensayada.

El resultado de esta prueba fue de 1.7 g/Kg, estando dentro de lo solicitado por la especificación IDU 510-18.

5.2.9 Terrones de arcilla:

Este ensayo se utiliza para determinar aproximadamente los terrones de arcilla y partículas deleznable que tiene el material. (INV E-211-13).

Para este ensayo se obtuvo un valor 0,07%, entrando en el parámetro, donde el máximo es el 2% planteado por la especificación IDU 510-18.

5.2.10 Partículas fracturadas mecánicamente

Este método de ensayo consiste en tomar una muestra que dependa del tamaño máximo nominal agregado, se lava y se deja a una temperatura constante de 110°C, una vez realizado esto, se realiza una inspección visual para determinar si es fracturó y cuántas caras fracturadas tiene. Esto se puede realizar en cantidad o en masa, y una vez se tenga este dato, se debe dar un resultado en porcentaje de caras fracturas sobre la cantidad o masa inicial.

El resultado de este ensayo fue del 45% teniendo así el valor dentro del parámetro solicitado por la especificación IDU 510-18. (El resultado se obtuvo de manera visual)

5.2.11: Partículas planas y alargadas:

Se miden partículas individuales del agregado de una fracción de tamaño específico para así determinar las relaciones de ancho/espesor, largo/ancho o largo/espesor.

Se determina el cociente de longitud máxima entre longitud mínima de cada partícula con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{L}{E} > 5$$

Donde: C es el Cociente

L: Largo (Longitud máxima)

E: Espesor (Longitud mínima)

Una vez se realizan los cálculos, se procede a pesar las partículas planas y alargadas y se registra este peso.

Para este ensayo se obtuvo un resultado promedio del 17 %, dentro de lo que solicita la especificación IDU 510-18.

5.2.12 Angularidad del Agregado Fino:

Este ensayo se realiza en la fracción que pasa por el tamiz No. 4 de un agregado para mezcla asfáltica, pues se tiene como índice la prevención de las fallas por deformaciones plásticas en el pavimento. Se selecciona la muestra de agregado fino, y este es golpeado para así determinar su masa pesándolo. El contenido de vacío es en estado suelto es calculado como la diferencia entre el volumen de la medida cilíndrica y el volumen absoluto del agregado fino como se muestra en la siguiente fórmula:

$$\%a = \frac{V - W_{agreg}/Gsb}{V} * 100$$

Donde:

V: Volumen del cilindro (ml)

W: Peso neto del agregado (gr.)

Gsb = Gravedad específica del agregado fino

%a= Vacíos sin compactar en el material en % (Angularidad)

El resultado para este ensayo fue de 53% estando dentro del parámetro especificado por la especificación IDU 510-18.

5.2.13 CBR% mínimo:

Ensayo que se ejecuta para evaluar la calidad de un material de suelo con en su resistencia, medida a través de un ensayo de placa a escala. Obteniendo un resultado promedio de 50,6% al 100% del Proctor y al 24% al 95% del Proctor. estando dentro del límite solicitado por la especificación IDU 510-18.

5.2.14 Módulo Resiliente:

Este ensayo se realiza para poder determinar la medida de capacidad de un material para almacenar o absorber energía sin que este experimente una deformación permanente.

$$Mr = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_{axial}} = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{axial}}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal mayor

σ_2 = Esfuerzo principal menor

σ_d = Esfuerzo desviador

ε_{axial} = Deformación recuperable

Sin embargo, debido a que no se contaba con el equipo necesario se calculó el módulo resiliente para el RAP a partir de la fórmula de Lister (1987) y aceptada por la AASHTO (2004) la cual está expresada por:

$$Mr (Mpa) = 17.6 \times CBR^{0.64}$$

Donde:

CBR = 24%







El resultado obtenido fue de 134 MPa estando dentro de lo solicitado por la especificación IDU 510-18.





A continuación, se evidencia un registro fotográfico de los procedimientos realizados en la Universidad de La Sabana:

Tabla 2.

Registro fotográfico ensayos realizados

	
<p>Pesaje de muestra para ensayo</p>	<p>Pesaje de muestra para ensayo</p>
	
<p>Pesaje de muestra para ensayo</p>	<p>Pesaje de muestra para ensayo</p>

	
<p>Muestra en horno a temperatura solicitada por especificación para poder trabajarlo de manera seca</p>	<p>Cuardeo de muestra para selección</p>
	
<p>Lavado de muestra</p>	<p>Secado de muestra lavada</p>
	
<p>Tamizado de muestra</p>	<p>Lavado de muestra después de tamizar</p>

	
Muestra en Máquina de Los Ángeles	Muestra después de Ensayo de Máquina de Los Ángeles
	
Alistamiento muestra	Muestra lista

Fuente: Propia

5.3 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE UN PAVIMENTO ASFÁLTICO CON RAP:

Para realizar el diseño de estructura asfáltica, se analizaron los datos del CCSN donde se informaba de la cantidad de vehículos que circulaban por el corredor vial durante el año, con esto, se utilizó el método TPD (Tránsito Promedio Diario) que corresponde al número de vehículos que pasan durante un periodo determinado (en días completos) igual o menor a un año y mayor a un día dividido por el número de días del periodo completo (Alonzo y Rodríguez, 2005). El resultado a partir de este método es 37196 vehículos como tránsito promedio diario en las vías estudiadas.

Gracias al método TPD, se obtuvo el n (número de ejes equivalentes), que es la cantidad pronosticada de repeticiones de eje de carga equivalente a 80 kN para un periodo determinado. (Morales, K et, al, 2012).

A partir del valor de número de ejes equivalente, se procede a realizar el diseño de la estructura asfáltica a partir del libro guía “Pavimentos – Materiales, Construcción y Diseño (Rondón, H.A y Reyes, F.A, 2022) siguiendo la guía de diseño AASHTO (1993) para pavimento flexible que es la guía aprobada por el IDU para diseñar estructuras asfálticas nuevas o rehabilitadas.

Para poder realizar el diseño de la estructura asfáltica, se deben tener las variables de diseño, obtenidas de diferentes maneras, unas a partir de los ensayos realizados, otras a partir de las tablas que da el libro guía y, por último, del TPD.

Estas variables se muestran así: el valor de tránsito que se obtuvo a partir de la proyección a 10 años, que fue de 23771642 vehículos totales que pasaran por la vía en la proyección., una confiabilidad del 95%, una desviación del -1.645 y un error estándar del 0.45, un índice de serviciabilidad final de 3. Asimismo, se agregan los módulos resilientes de la subrasante, subbase, base y capa asfáltica. (Tabla 19 – Anexo).

A partir de estos valores, se proceden a usar los valores de diseño obtenidos a partir de las variables de diseño mencionadas anteriormente y luego se pasa a calcular los números estructurales de las capas a partir de los logaritmos dados por la guía de diseño AASHTO (1993).

Con esto, se obtuvo que para el espesor de la capa según la guía AASHTO (1993), usando el material de fresado se debe tener una capa de base granular de 27.7 cm, una capa de subbase granular 16.8 cm, y una capa de asfalto 9.1 cm. (Tabla 22 del Anexo).¹

Una vez realizado esto, se procedió a realizar una simulación empírico-mecanicista para hallar las repeticiones admisibles por deformación a tracción en la carpeta asfáltica inferior existente, se considera la ecuación de Shell para una confiabilidad

¹ Nota: Como alcance de la presente investigación, no se realiza diseño con base convencional.

del 95%, para deflexión admisible el criterio de Yang H. Huang, para las repeticiones admisibles por deformación a compresión en la parte superior de la subrasante, el criterio Shell y para el esfuerzo admisible a compresión en la parte superior de la subrasante el criterio de Kerhoven y Dormon.

Para la realizar la simulación se utilizó el programa WinDepav 2.6, en el cual se agregan las variables de los espesores de capas y sus respectivos números de Poisson como se muestra a continuación:

Descripción del proyecto (no use comas)

PROYECTO DE GRADO

Número de capas: 2 3 4 5 6

Archivo: C:\Users\mano1\Downloads\MANUEL.pav

Estructura y criterios de evaluación de comportamiento por fatiga y ahuellamiento

Capa	E (kgf/cm ²)	ν	h (cm)	Liga	Daño por tensión		N esperado	Daño por compresión		N esperado
					C*k1*(1/E)^k3	k2		k4	k5	
1	28125	0.35	9.1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
2	1366	0.40	27.7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
3	1195	0.40	16.8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>
4	685	0.45		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>			<input type="checkbox"/>

Carga en la superficie del pavimento

Seleccionar modelo de carga

Radio del área de contacto (cm): 12,50

Distancia entre ruedas (cm): 37,50

Presión de contacto (kgf/cm²): 6,753

IMPORTANTE: Para el correcto funcionamiento de WinDEPAV es necesario que el sistema operativo reconozca el punto (.) como símbolo decimal y la coma (,) como separador de listas.

Este programa requiere el software DOSBox para funcionar en sistemas operativos de 64 bits.

Escriba al correo electrónico: ingepav@gmail.com, si requiere algún tipo de asistencia en el uso de WinDEPAV.

Luis Ricardo Vásquez Varela, 2018.

A partir de esto, se selecciona el método de carga a utilizar, que sería el método de la Guía Francesa 1994, el cual es utilizado por el IDU.

Una vez seleccionado este método, se corre el programa, donde se obtienen los siguientes resultados:

Resultados del análisis

Archivo: C:\Users\mano\Downloads\MANUEL.pav

Descripción del proyecto: PROYECTO DE GRADO

Sistema de carga: Radio de las ruedas (cm) 10,80; Distancia entre los centros de las ruedas (cm) 32,40; Presión de contacto de las ruedas (kg/cm²) 5,594

Posición del valor máximo para una carga: A Bajo una rueda simple; B Bajo una de las ruedas de la carga; C Al centro de la carga

Gráficos de respuesta

Exportar resultados a Excel (csv)

Respuestas estructurales en las interfaces y evaluación del comportamiento por fatiga y ahuellamiento.

Número de capas: 5

No.	E (kgf/cm ²)	v	Z (cm)	Tracción (fatiga)		Compresión	
				Sigma T (kgf/cm ²)	Sigma Z (kgf/cm ²)	Épsilon T (microstrain)	Épsilon Z (microstrain)
1	3,500E+04	0,30	0,00	1,132E+01	5,598E+00	193,0	-89,6
	Continua		12,00	-7,067E+00	1,581E+00	-168,0	153,0
2	3,500E+03	0,35	12,00	2,345E-02	1,581E+00	-168,0	431,0
	Continua		33,00	-4,568E-01	5,292E-01	-149,0	231,0
3	1,800E+03	0,35	33,00	-9,626E-02	5,292E-01	-149,0	320,0
	Continua		48,00	-1,173E-01	3,080E-01	-107,0	212,0
4	1,800E+03	0,35	48,00	-1,173E-01	3,080E-01	-107,0	212,0
	Continua		63,00	-1,917E-01	1,948E-01	-110,0	180,0
5	7,964E+02	0,40	63,00	-1,183E-02	1,948E-01	-110,0	253,0

Deflexión en el centro de la rueda doble D0 (1/100 mm) 36,81

Radio de curvatura (m) 267,88

Radio de curvatura x Deflexión (m x mm/100) 9861,8

Salir y descartar los resultados

Obteniendo un valor de tracción de -168 y un valor de compresión de 253, así como un valor de esfuerzo vertical de 0.019 MPa y una deflexión de 36.81 (1/100mm). A partir de estos resultados, se procede a hacer las verificaciones mencionadas, usando el número de ejes equivalentes obtenidos a partir del método TPD y los espesores de capas que se obtuvieron en el diseño de la estructura asfáltica. Es importante mencionar, que estos valores de capa se aproximan a un dígito cerrado debido a que al momento de hacer la instalación del material es mucho más sencillo tener capas con espesores cerrados.

Tabla. 3

Datos de entrada para verificación de la estructura asfáltica.

Número Ejes Equivalentes	Espesor de Capa (m)			Módulo de Capa (MPa)				
	MD-19	BG-A	SBG-B	MD-19	GCR	BG-G	SBG-B	SBR
NESE	MD-19	BG-A	SBG-B	MD-19	GCR	BG-G	SBG-B	SBR
2.38E+07	9.00	28.00	17.00	1757	-	134	117	67

Fuente: Propia

Tabla 4. Análisis Mecanicista para verificación de la estructura asfáltica

Esfuerzos y Deflexiones Admisibles		Repeticiones admisibles		Verificaciones			
Dormon Kerhoven	Huang	Shell					
Esfuerzo Vertical	Deflexión	Fatiga	Ahuellamiento	Fatiga	Ahuellamiento	Esfuerzo Vertical	Deflexión
0.076	4.19E-01	2.65E+07	4.73E+07	cumple	cumple	cumple	cumple

Fuente: Propia

Tabla 5. Porcentajes de cumplimiento de tracción y compresión

Porcentajes de cumplimiento			
Fatiga	Ahuellamiento	Esfuerzo Vertical	Deflexión
90%	50%	26%	88%

Fuente: Propia

A partir, de las verificaciones de las verificaciones realizadas, se puede ver el cumplimiento de la fatiga, ahuellamiento, esfuerzo vertical y deflexión y los porcentajes de cumplimiento, debajo del 100% que es el máximo establecido. Mostrando así que, técnicamente el proyecto cumpliría.

5.4 APUS PARA COMPARACIÓN:

Una vez realizado los ensayos y el respectivo diseño de la estructura asfáltica, se procedió a desarrollar el respectivo APU (Análisis de Precio Unitario) que es el examen que se hace a una unidad de obra con la finalidad de conocer por separado las diferentes características de construcción y también poder tener en cuenta los elementos de costos que lo componen, de esta manera poder establecer su precio previo a la construcción y poder demostrar de una manera lógica el costo.

Para el material de fresado se realizaron los APUS correspondientes para así poder comparar el valor de una base que no fuera a partir del material reciclado, obteniendo lo siguiente:

APU para material no reciclado:

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	BASE GRANULAR CLASE BG_A				
	Unidad				m3
I. EQUIPO					
Descripcion	Unidad	Tarifa/hora	Rendimiento	Valor Unit	
Carrotanque de Agua (1000 galones)	\$/hora	\$ 160.000,00	0,02	\$ 3.200,00	
Motoniveladora potencia 215 HP o similar	\$/hora	\$ 180.000,00	0,02	\$ 3.600,00	
Vibrocompactador 153 hp, 10 ton o similar	\$/mes	\$ 12.000.000,00	0,00077	\$ 9.230,77	
Sub-total				\$ 16.030,77	
II. MATERIALES EN OBRA					
Descripcion	Unidad	Precio-Unit	Cantidad	Valor- Unit	
Agua (Viaje de agua de 6000 lts)	lts	\$ 120.000,00	0,007	\$ 833,33	
Material de base	m3	\$ 85.561,00	1,3	\$ 111.229,30	
Sub-total				\$ 112.062,63	
III. TRANSPORTES					
Material	Cantidad transportada (m3)	Distancia [Km]	m3-Km	Tarifa / [und-km]	Valor total
Transporte de agregados pétreos a 22 km	1,3	22	28,6	\$ 914,00	\$ 26.140,40
Sub-total				\$ 26.140,40	
IV. MANO DE OBRA					
Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal total	Rendimiento	Valor Total
Maestro de obra	\$ 150.000,00	85%	\$ 277.500,00	0,0025	\$ 693,75
Oficial de obra	\$ 62.280,00	85%	\$ 115.218,00	0,0025	\$ 288,05
Ayudante de obra	52300	85%	\$ 96.755,00	0,0025	\$ 241,89
Sub-total				\$ 1.223,68	
TOTAL COSTO DIRECTO				\$ 155.457,49	

APU para material reciclado:

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
ITEM	BASE GRANULAR CLASE BG_A CON MATERIAL RECICLADO				
	Unidad			m3	
I. EQUIPO					
Descripcion	Unidad	Tarifa/hora	Rendimiento	Valor Unit	
Carrotanque de Agua (1000 galones)	\$/hora	\$ 160.000,00	0,02	\$ 3.200,00	
Motoniveladora potencia 215 HP o similar	\$/hora	\$ 180.000,00	0,02	\$ 3.600,00	
Vibrocompactador 153 hp, 10 ton o similar	\$/mes	\$ 12.000.000,00	0,00077	\$ 9.230,77	
Sub-total				\$ 16.030,77	
II. MATERIALES EN OBRA					
Descripcion	Unidad	Precio-Unit	Cantidad	Valor- Unit	
Agua (Viaje de agua de 6000 lts)	lts	\$ 120.000,00	0,0069444	\$ 833,33	
Sub-total				\$ 833,33	
III. TRANSPORTES					
Material	Cantidad transportada (m3)	Distancia [Km]	m3-Km	Tarifa / [und-km]	Valor total
Transporte de agregados pétreos a 2 km	1,3	2	2,6	\$ 5.027,00	\$ 13.070,20
Sub-total				\$ 13.070,20	
IV. MANO DE OBRA					
Trabajador	Jornal	Prestaciones	Jornal total	Rendimiento	Valor Total
Maestro de obra	\$ 150.000,00	85%	\$ 277.500,00	0,0025	\$ 693,75
Oficial de obra	\$ 62.280,00	85%	\$ 115.218,00	0,0025	\$ 288,05
Ayudante de obra	52300	85%	\$ 96.755,00	0,0025	\$ 241,89
Sub-total				\$ 1.223,68	
TOTAL COSTO DIRECTO				\$ 31.157,99	

Teniendo en cuenta que los APUs, son para un metro cúbico se procede a realizar el cálculo para los cuatro mil metros cúbicos que se tienen en el patio y se compara con el valor de 4000 m3 para una base de un material granular convencional, obteniendo que:

El material convencional generaría un costo total para la empresa de \$621.829.940,26, a comparación del material de fresado que tendría un costo total de \$124.631.940,26, teniendo una reducción del 20% en tema de gastos, que en términos de dinero serían: \$497.198.000,00.

Asimismo, hay que tener en cuenta que, la empresa está pagando por arriendo \$3.000, por m2 y se tienen aproximadamente 305 m2 del material de fresado,

generando así un costo mensual de \$915.000, pero es importante tomar a consideración, que en el peor de los casos el proyecto podría durar aproximadamente 9 años, generando un costo total de \$98.820.000,00. Entonces, se podría tomar en cuenta que el poder usar este material generaría un ahorro adicional si se desocupa este espacio que está ocupando el material de fresado.

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir que:

1. Para el material de fresado que tiene a disposición el Consorcio Constructor Sabana Norte se realizaron todos los ensayos de ensayo que son establecidos en la especificación IDU 510-18, permitiendo así corroborar que en cada uno de ellos se cumplen con los parámetros de calidad de dicho material.
2. El ensayo que no cumplió el material es la prueba de contenido de materia orgánica, que como se mencionó antes, ya que este material está compuesto con asfalto, al momento de hacerla, se calienta la muestra generando así que el asfalto se evapore, y haya una variación en el peso de la muestra, lo que da a entender que hay materia orgánica en la muestra. Sin embargo, al momento de consultar con el IDU, se planteó un ensayo homologado, el cual permitió evaluar el material y se obtuvo que el material analizado no presenta materia orgánica.
3. Se llevaron a cabo análisis de precios unitarios para los dos escenarios posibles que tenía la empresa: el uso de material granular natural y el uso de material de fresado como base. Los resultados demostraron que el material de fresado es más económico (ahorro de \$497.198.000,00 frente a la alternativa con material natural) y ofrece mayores beneficios para la construcción de vías nuevas o la reparación de vías en mal estado, como el parcheo o bacheo en la autopista norte.
4. El proyecto es viable porque cumple los 3 objetivos planteados en este proyecto de grado, en ensayos de ensayos para la especificación IDU 510-

18, la guía de diseño AASHTO para la estructura asfáltica y un ahorro considerativo para la empresa realizando los análisis de precios unitarios.

7. RECOMENDACIONES

Gracias a las conclusiones y resultados obtenidos anteriormente se le puede recomendar al Consorcio Constructor Sabana Norte lo siguiente:

1. Realizar un estudio el cual permita verificar si el material además de servir como un base, podría servir como un aditivo para asfalto o un nuevo asfalto.
2. Acopiar el material de una manera adecuada, para que así el material no pierda propiedades y cuente con menor contaminación.
3. Al momento de instalar el material como base, cumplir a cabalidad el espesor solicitado, para que de esta manera logre cumplir con lo solicitado por el diseño de la carpeta asfáltica.
4. Tener en cuenta que el uso del material ayudará a reducir el impacto ambiental de la nueva producción de asfalto.

8. REFERENCIAS:

1. Abe, A. A., Rossi, C. O., Eskandarsefat, S., Porto, M., Loise, V., Venturini, L., & Caputo, P. (2023). Reclaimed asphalt recycling agents: Looking into the blueprint of their mechanisms of action. *Construction and Building Materials*, 363 doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129843
2. Bruno, M., Tataranni, P., & Sangiorgi, C. (2023). Experimental application of fully recycled asphalt concretes produced with chemical additives for patch pavement rehabilitation. *Construction and Building Materials*, 363 doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.129807
3. Wang, T., & Wang, J. (2022). Study on mechanical properties of in situ granulated recycled cement stabilized macadam for cement concrete pavement. Paper presented at the Advances in Transdisciplinary Engineering, , 31 872-878. doi:10.3233/ATDE220947 Retrieved from www.scopus.com
4. Wang, F., Hoff, I., Yang, F., Wu, S., Xie, J., Li, N., & Zhang, L. (2021). Comparative assessments for environmental impacts from three advanced asphalt pavement construction cases. *Journal of Cleaner Production*, 297 doi:10.1016/j.jclepro.2021.126659
5. White, G., Fairweather, H., & Jamshidi, A. (2018). Sustainable runway pavement rehabilitation: A case study of an Australian airport. *Journal of Cleaner Production*, 204, 380-389. doi:10.1016/j.jclepro.2018.08.305
6. Sasidharan, D., Toshikhani, A., Gottumukkala, B., & Yadav, J. (2023). Characterization of recycled asphalt pavement materials for use in hot-mix asphalt mixes. *Journal of Testing and Evaluation*, 51(5) doi:10.1520/JTE20220533
7. Infraestructura, A. N. (2016, December 30). *Precio Unitario*. Portal ANI. <https://www.ani.gov.co/sig/formato/precio-unitario-26686>
8. Análisis de Precios Unitarios | Datacauca. (n.d.). <https://datacauca.gov.co/apu/apu/apu/query>

9. Ingeniero, C. del. (n.d.). *Ejes equivalentes*. CUEVA DEL INGENIERO CIVIL. <https://www.cuevadelcivil.com/2010/05/ejes-equivalentes.html>
10. *Granulometría: Análisis granulométrico de suelos tamizado*. COTECNO. (2022, March 25). <https://www.cotecno.cl/granulometria-analisis-granulometrico-suelos/#:~:text=La%20granulometr%C3%ADa%20permite%20estudiar%20y,las%20part%C3%ADculas%20es%20muy%20peque%C3%B1o>.
11. Munera Miranda, J. C., & Aguiar Moya PhD., J. P. (2019, June). *Estimación del Módulo Resiliente Para Materiales granulares de Costa Rica*. Infraestructura Vial. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-37052019000100012#:~:text=El%20m%C3%B3dulo%20resiliente%20es%20una,y%20dise%C3%B1o%20de%20pavimentos%20flexibles.
12. Sanchez, F. (2023, June 22). *¿Qué Es el cbr? - aprende geotecnia*. Geotechtips. <https://www.geotechtips.com/post/que-es-el-cbr>
13. Garg, N., & Thompson, M. (n.d.). Lincoln Avenue Reclaimed Asphalt Pavement Base Project. SageJournals. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0361198196154700113?journalCode=tra>
14. Morales, K., Orozco, E., & Campos, S. (2012). Determinación de los Factores Equivalentes de Carga y Cálculo de los Ejes Equivalentes de Carga (Esal's) de la Carretera León –Poneloya. <https://ribuni.uni.edu.ni/1023/1/38251.pdf>.
15. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. (1993). . AASHTO.

ANEXOS

1. RESULTADOS DE ENSAYO**1.1 GRANULOMETRIA:**

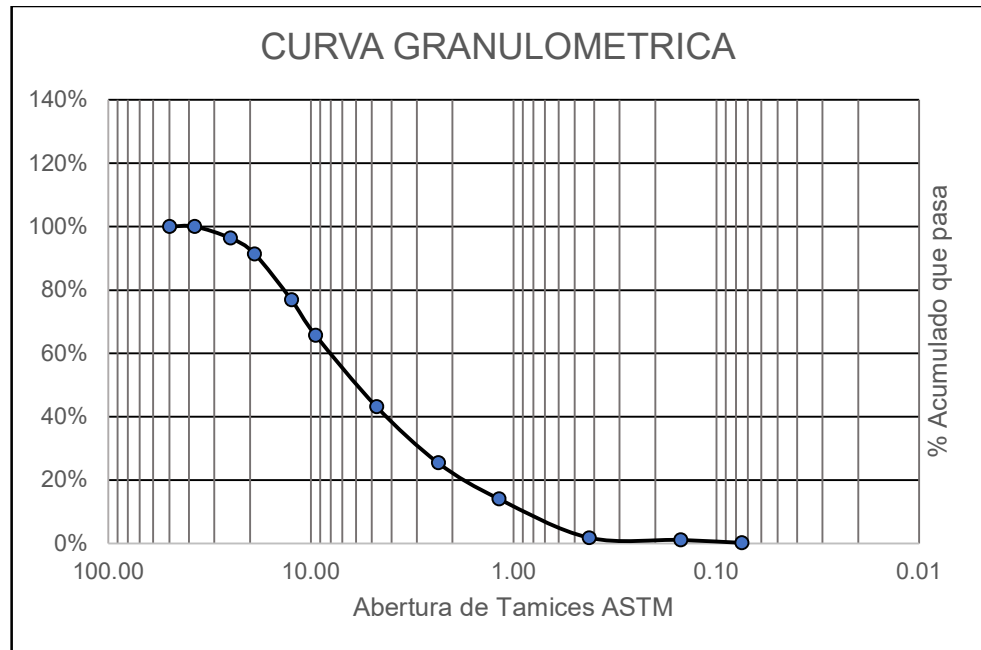
Tabla 1.

Tabla de Análisis Granulométrico Por Tamizado

TABLA DE ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO					
Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida en cada tamiz (gr)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
2"	50	0	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	37.5	0	0.00%	0.00%	100.00%
1"	25.000	681.3	3.60%	3.60%	96.40%
3/4"	19.000	944.9	4.99%	8.59%	91.41%
1/2"	12.500	2745.5	14.50%	23.09%	76.91%
3/8"	9.500	2113.2	11.16%	34.25%	65.75%
N°4	4.750	4271.7	22.56%	56.82%	43.18%
N°08	2.360	3342.9	17.66%	74.47%	25.53%
N°16	1.180	2173.4	11.48%	85.95%	14.05%
N°40	0.425	2310.3	12.20%	98.16%	1.84%
N°100	0.150	134.1	0.71%	98.87%	1.13%
N°200	0.075	175.3	0.93%	99.79%	0.21%
Fondo		39.5	0.21%	100.00%	0.00%
Total		18932.1			

Fuente: Propia

Ilustración 1. Curva Granulométrica



Fuente: Propia

1.2 MÁQUINA DE LOS ÁNGELES:

Tabla 2.

Variables Prueba de Máquina de Los Ángeles

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tamaño máximo nominal	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"
# de esferas	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Masa de muestra antes del ensayo (g)	5000	5000,4	5000,4	5000,4	4998,8	4998,8	4998,8	4998,8	4999,4	4999,4	4999,4	4999,4
Masa de muestra seca después del ensayo previo lavado tamiz #12 (g)	3501,5	3501,5	3501,5	3501,5	3385,1	3385,1	3385,1	3385,1	3409,8	3409,8	3409,8	3409,8
Perdida del agregado (g)	3502	3502	3502	3502	3385	3385	3385	3385	3410	3410	3410	3410
Desgaste (%) 100 revoluciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Desgaste (%) 500 revoluciones	30	30	30	30	32	32	32	32	32	32	32	32

Fuente: Propia

Tabla 3.
Resultados Máquina de Los Ángeles

Prueba	1
Tamaño máximo nominal	1"
# de esferas	11
Masa de muestra antes del ensayo (g)	5000
Masa de muestra seca después del ensayo previo lavado tamiz #12 (g)	3342
Perdida del agregado (g)	3342
Desgaste (%) 100 revoluciones	0
Desgaste (%) 500 revoluciones	33.16

Fuente: Propia

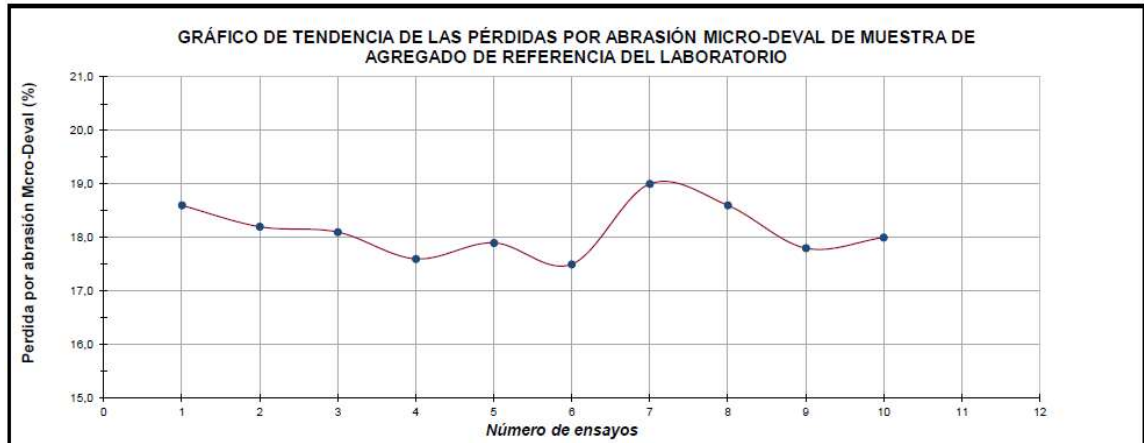
1.3 MICRO DEVAL:

Tabla 4.
Resultados Micro Deval

Prueba	1	2	3	4
Método de gradación	7,2	7,2	7,2	7,2
Tamaño máximo del agregado	25	25	25	25
Masa de las esferas (g)	5505	5505	5505	5505
# de rev x minuto	100	100	100	100
Tiempo de ensayo (min)	120	120	120	120
Masa de la muestra seca antes del ensayo	1501	1501	1501	1501
Masa de la muestra seca después del ensayo	1218	1218	1218	1218
Perdida por abrasión del ensayo (%)	18,8	18,8	18,8	18,8

Fuente: Propia

Ilustración 2.
Gráfico Resultados Micro Deval



Fuente: Propia

1.4 10% de finos:

Tabla 5. Resultados Ensayo 10% de Finos

Prueba	1		2		3		4		5		6	
	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado
Masa de la muestra ensayada (g)	2273	2383	2273	2383	2273	2383	2273	2383	2236	2299	2236	2299
Masa que pasa por tamiz #8 (g)	188	190	188	190	188	190	188	190	197	184	197	184
Finos producidos (%)	8,3	8	8,3	8	8,3	8	8,3	8	8,8	8	8,8	8
Fuerzo máxima aplicada (kN)	59,6	47,9	59,6	47,9	59,6	47,9	59,6	47,9	90,1	77,9	90,1	77,9
Valor 10% de finos (kN)	70	60	70	60	70	60	70	60	100	90	100	90
Relación saturado/seco (%)	86		86		86		86		90		90	

Fuente: Propia

1.5 MATERIAL ORGÁNICO:

Tabla 6.
Resultados Material Orgánico por Ignición.

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
A = Masa del crisol + Espécimen seco (g)	62,26	72,87	77,24
B = Masa del recipiente + Espécimen después de la mufla (g)	59,69	69,86	74,00
C = Masa del crisol (g)	29,89	34,79	34,89
% de materia orgánica	7,9	7,9	7,7

Fuente: Propia

Tabla 7.
Resultados Material Orgánico por Permanganato potásico.

Ensayo #	Materia Orgánica (%)
1	0
2	0
3	0
4	0
VALOR MEDIO	0

Fuente: Propia

1.6 LÍMITE LIQUIDO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD:

Tabla 8.
Resultados Límite Líquido y Límite Plástico

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
Límite Líquido (%)	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P
Índice de plasticidad (%)	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P

Fuente: Propia

1.7 ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENA:

Tabla 9.

Resultados Ensayo de Equivalente de Arena

Prueba	1			2			3			4		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Muestra ensayada (g)	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88	88
Lectura de arcilla (mm)	93	92	92	93	92	92	93	92	92	93	92	92
Lectura de arena (mm)	81	80	79	81	80	79	81	80	79	81	80	79
Equivalente de arena (%)	87	87	86	87	87	86	87	87	86	87	87	86
Promedio	87%			87%			87%			87%		

Fuente: Propia

1.8 AZUL DE METILENO:

Tabla 10.

Resultados Ensayo Azul de Metileno

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8
Ensayo realizado pasa tamiz	No. 200	No. 200	No. 200	No. 200	No. 200	No. 200	No. 200	No. 200
Masa de la muestra (g)	29,59	30	30	30	29,59	29,59	29,59	29,59
Volumen total añadido de la solución colorante	5	5	5	5	5	5	5	5
Valor de azul de metileno (g/Kg)	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7

Fuente: Propia

1.9 TERRONES DE ARCILLA:

Tabla 11.
Resultados Ensayo Terrones de Arcilla

Tamiz ("/No)	Masa Inicial (g)	Tamiz Lavado ("/No)	Masa Final (g)	TA/PD (%)
Mayores de 1-1/2"	-	No 4	-	0
1- 1/2" – 3/4"	-	No 4	-	0
3/4" – 3/8"	-	No 4	-	0
3/8" – No 4	1002	No 4	1002	0
No 4 – No 16	53.2	No 20	53.1	0.2
Terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado grueso %	0.00			
Terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado fino %	0.19			
Terrones de arcilla y partículas deleznales del agregado %	0.07			

Fuente: Propia

1.10 PARTICULAS FRACTURADAS MECÁNICAMENTE:

Este ensayo fue realizado de manera visual, es por esto por lo que no se cuenta con datos como en los anteriores ensayos.

1.11 PARTICULAS PLANAS Y ALARGADAS

Tabla 12.

Relación del Tamaño máximo nominal vs Peso mínimo de la Partícula

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida en cada tamiz (gr)
(1)	(2)	(3)
2"	50	0
1 1/2"	37.5	0
1"	25.000	681.3
3/4"	19.000	944.9
1/2"	12.500	2745.5
3/8"	9.500	2113.2
N°4	4.750	4271.7
N°08	2.360	3342.9
N°16	1.180	2173.4
N°40	0.425	2310.3
N°100	0.150	134.1
N°200	0.075	175.3
Fondo		39.5
Total		18932.1

Fuente: Propia

1.12 ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO:

Tabla 13.

Resultados Angularidad del Agregado Fino

Ensa yo	Peso cilindro (g)	Peso de muestra + cilindro (g)	Peso muestra (g)	Porcentaje de vacíos fino sin compactar	Prome dio
1	282	432	150	0.53	53%
2	282	432	150	0.53	
3	282	432	150	0.53	
4	282	432	150	0.53	
5	282	432	150	0.53	

Fuente: Propia

1.13 CBR MÍNIMO

Tabla 14.
Resultados CBR Mínimo

Peso unitario seco máximo (lbf/pie)	120
Humedad Óptima	3.7
95% del Peso Unitario Seco (lbf/pie)	113.6
CBR 95% Proctor (%)	24
CBR 100% Proctor (%)	51

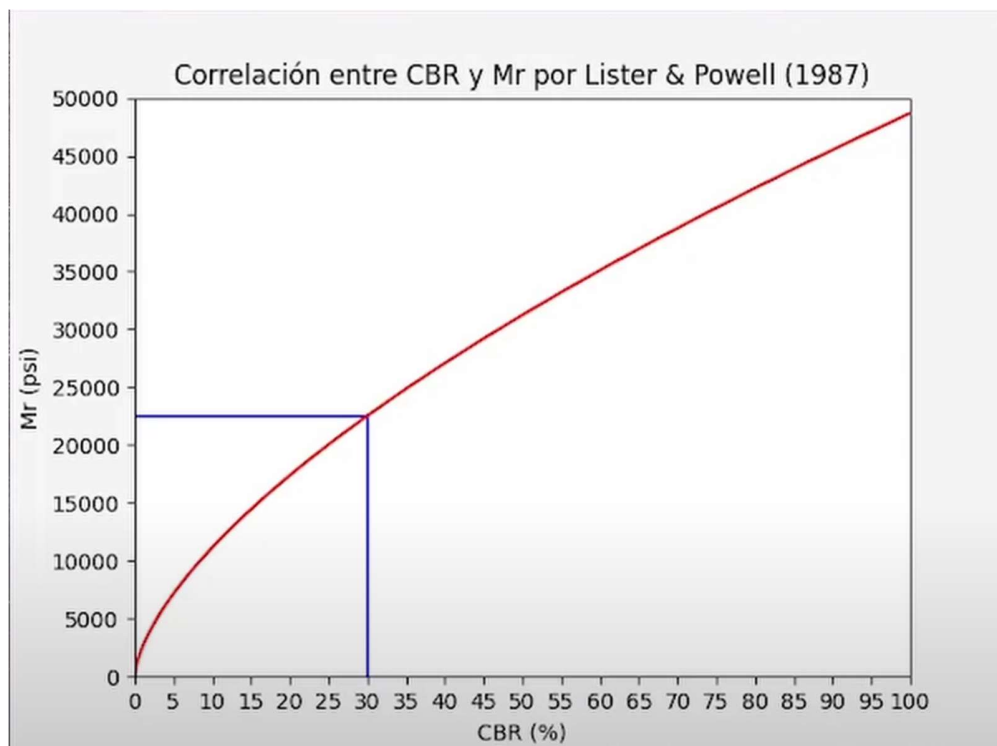
Fuente: Propia

1.14 MÓDULO RESILIENTE

Tabla 15.
Resultados Modulo Resiliente a partir de correlación Lister (1987) – AASHTO (2004)

CBR al 95%	Valor dado por fórmula	Exponencial	Mr calculado (MPa)	Mr Calculado (psi)
24	17,6	0,64	134,5388969	19513,25

Fuente: Propia



2. CÁLCULOS TRÁNSITO PROMEDIO DIARIO:

Tabla 16.

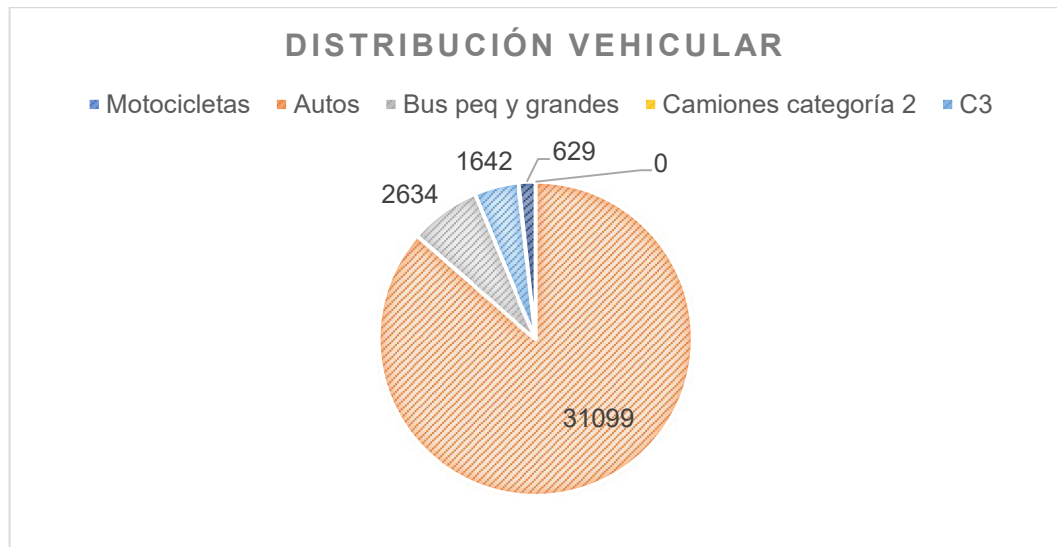
Variables Tránsito promedio Diario

AFORO VEHICULAR					
DIAS EVALUADOS	365	TOTALES	%	Ponderado Semana	Factor Camión
365	PROMEDIO DIA				FC
31099					31099
2634	2634	7.08%	2634	7902.00	
1642	1642	4.41%	1642	4926.00	
629	629	1.69%	629	2516.00	
281	281	0.76%	281	1045.32	
397	397	1.07%	397	2786.94	
514	514	1.38%	514	2847.56	
37196	37196	98.62%		15344.00	
TPDS					37196
TPDS COMERCIALES					6097.00
% Comerciales					0.1700
FC					2.52

Fuente: Propia

Ilustración 3

Distribución Tránsito Promedio Diario



Fuente: Propia

Tabla 17.
Variables Obtenidas a TPD

TPD	37196.00
Fd	0.60
%VC	0.1700
FC	2.52
Factor Carril	0.6
r (tasa crec.)	3.5%
n (años proy)	20.00

Fuente: Propia

Tabla 18.
Variables para Cálculo del n (ejes equivalentes)

Año	Año de proyección	Autos	bus pequeño y grande	Camió n c2	Camió n c3	Camió n c4	Camió n c5	c5 en adelante	TPDS	NESE
1	2024	31099	2634	1642	629	281	397	514	36004	2024032
2	2025	32194	2727	1700	652	291	411	533	37273	2095371
3	2026	33328	2823	1760	675	302	426	552	38586	2169184
4	2027	34502	2923	1822	699	313	441	572	39946	2245639
5	2028	35717	3026	1887	724	325	457	593	41354	2324793
6	2029	36975	3133	1954	750	337	474	614	42812	2406757
7	2030	38277	3244	2023	777	349	491	636	44321	2491588
8	2031	39625	3359	2095	805	362	509	659	45884	2579455
9	2032	41020	3478	2169	834	375	527	683	47501	2670358
10	2033	42464	3601	2246	864	389	546	708	49175	2764465
n	23771642									

Fuente: Propia

3. DISEÑO DE ESTRUCTURA ASFÁLTICA:

Tabla 19.
Variables de Diseño para Estructura Asfáltica

VARIABLES DE DISEÑO		
Tránsito (Capítulo 13.1.2)	W_{18}	23771642,00
Confiabilidad (Tabla 13.14)	R (%)	95,00
Desviación (Tabla 13.15)	Z_r [-]	-1,65
Error estándar (Tabla 13.16)	s_o [-]	0,45
Índice de serviciabilidad final (Tabla 13.10)	p_f [-]	3,00
Módulo resiliente de la subrasante (Ecuación 8.9, 8.12 u otra similar)	$M_{r_{subr}}$ [Mpa]	67,20
Módulo resiliente de la subbase (Figura 13.9)	$M_{r_{SBG}}$ [Mpa]	117,21
Módulo resiliente de la base (Figura 13.8)	$M_{r_{BG}}$ [Mpa]	1804,60
Módulo resiliente de la capa asfáltica ($E_{ref}=400000$ psi a 20°C)	$M_{r_{concreto\ asf.}}$ [Mpa]	3102,64
Coefficiente de drenaje base granular (Tablas 13.11 y 13.12 o 13.13)	m_2 [-]	0,84
Coefficiente de drenaje subbase granular (Tablas 13.11 y 13.12 o 13.13)	m_3 [-]	0,84

Fuente: Propia

Tabla 20.
Valores Calculados Para Diseño

VALORES CALCULADOS	
Pérdida Índice de Serviabilidad (DPSI)	1.20
Coeficiente estructural a_1 (ecuación 13.8)	0.440
Coeficiente estructural a_2 (ecuación 13.9)	0.372
Coeficiente estructural a_3 (ecuación 13.10)	0.121
h_1 [pulgadas]	3.6
h_1 [cm]	9.1
SN_1^*	3.641
h_2 [pulgadas]	4.3
h_2 [cm]	10.9
SN_2^*	6.102
h_3 [pulgadas]	-4.4
h_3 [cm]	-11.1

Fuente: Propia

Tabla 21.
Cálculo de Números Estructurales de Capa

CALCULO DE NÚMEROS ESTRUCTURALES DE CAPA				
Logaritmo de la variable tránsito (ver Ecuación 13.18)	Log (W ₁₈)	7.3761		
SN ₁ (iterar este valor hasta que la celda "Ecuación 13.18"=Log (W18))	SN ₁	1.584	Ecuación 13.14	7.3761
SN ₂ (iterar este valor hasta que la celda "Ecuación 13.18"=Log (W18))	SN ₂	4.986	Ecuación 13.14	7.3761
SN ₃ (iterar este valor hasta que la celda "Ecuación 13.18"=Log (W18))	SN ₃	5.659	Ecuación 13.14	7.1822

Fuente: Propia

Tabla 22.
Espesores de Capa Según AASHTO

ESPESORES DE CAPA SEGÚN AASHTO (1993)		
Espesor de capa asfáltica	h ₁ [cm]	9.1
Espesor de base granular (Utilizando RAP)	h ₂ [cm]	27.7
Espesor de subbase granular	h ₃ [cm]	16.8

Fuente: Propia