

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



## **Estudio de pre factibilidad para la aplicación de nano fibras y nanotubos de carbono (CNTF) en pavimentos de concreto asfáltico e hidráulico**

Trabajo de graduación presentado por Juan Pablo de la Riva del  
Valle para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil

Guatemala,

2016



**Estudio de pre factibilidad para la aplicación de nano  
fibras y nanotubos de carbono (CNTF) en pavimentos de  
concreto asfáltico e hidráulico**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE  
GUATEMALA

Facultad de Ingeniería


**Estudio de pre factibilidad para la aplicación de nano  
fibras y nanotubos de carbono (CNTF) en pavimentos de  
concreto asfáltico e hidráulico**

Trabajo de graduación presentado por Juan Pablo de la Riva del  
Valle para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil

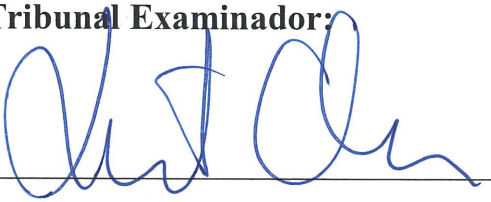
Guatemala,


2016

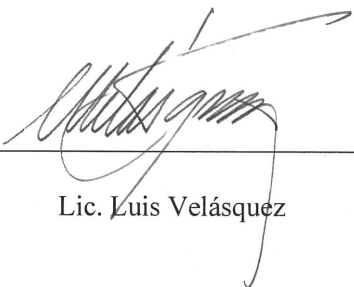
Vo. Bo. :

(f)  \_\_\_\_\_  
Ing. Rodrigo Rubio Haasler

**Tribunal Examinador:**

(f)  \_\_\_\_\_  
Ing. Roberto Godo Levensen

(f)  \_\_\_\_\_  
Ing. Rodrigo Rubio Haasler

(f)  \_\_\_\_\_  
Lic. Luis Velásquez

Fecha de aprobación: Guatemala, 08 de diciembre de 2016

# ÍNDICE

ÍNDICE.....	vi
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	ix
LISTA DE TABLAS Y GRÁFICAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xi
GLOSARIO .....	xiii
RESUMEN .....	xv
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. OBJETIVOS.....	2
A. Generales: .....	2
B. Específicos: .....	2
III. MARCO TEÓRICO .....	3
A. Nanotecnología aplicada.....	3
B. Ingeniería en pavimentos .....	5
1. Capas estructurales de los pavimentos.....	6
a. Subrasante. ....	6
b. Subbase.....	6
c. Base .....	6
d. Carpeta o superficie de rodadura.....	7
2. Pavimento .....	7
a. Pavimento flexible.....	8
1) Capa asfáltica.....	8
a) Mezcla asfáltica en frío .....	8
b) Mezcla asfáltica en caliente .....	8
c) Capas de protección .....	8
b. Pavimento rígido. ....	9
1) Concreto hidráulico sin refuerzo .....	9
2) Concreto hidráulico reforzado .....	9
3) Concreto hidráulico reforzado continuo .....	9
C. Ensayos y evaluación de suelo subrasante.....	9
1. Granulometría .....	9
2. Límites de Atterberg .....	10

3.	Ensayo de compactación Próctor modificado.....	11
4.	Ensayo de valor soporte CBR .....	12
D.	Metodología de diseño AASHTO 1993.....	12
1.	Metodología de diseño AASHTO 1993 para pavimentos flexibles. ....	12
2.	Metodología de diseño AASHTO 1993 para pavimentos rígidos .....	13
E.	Aplicación y diseño: Proyecciones de tránsito, módulos y coeficientes estructurales .....	14
1.	Tránsito promedio diario (TPD) .....	14
2.	Factores de diseño de tránsito .....	14
a.	Factor de distribución por carril (FCa).....	14
b.	Factor de distribución por sentido (Fd) .....	15
c.	Factor de agresión (Fe).....	15
3.	Ejes equivalentes (ESAL) .....	15
a.	Tipos de ejes.....	15
4.	Serviciabilidad del pavimento. ....	16
a.	Índice de regularidad Internacional (IRI).....	17
5.	Módulos y resistencia de los materiales .....	17
a.	Módulo de ruptura (Sc) .....	17
b.	Módulo resiliente (Mr) .....	17
c.	Módulo de elasticidad (E). ....	17
d.	Módulo de reacción de la subrasante (K).....	17
1)	Deflectómetro de impacto. ....	17
6.	Fatiga y ahuellamiento – Servicio y términos de durabilidad.....	18
IV.	METODOLOGÍA.....	19
A.	Toma de muestra de suelo subrasante.....	19
1.	Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos para la muestra de subrasante. ....	20
a.	Ensayo de granulometría.....	20
b.	Ensayo de límites de Atterberg .....	22
c.	Ensayo de compactación proctor modificado (porcentaje de humedad óptima y densidad máxima).....	23
d.	Ensayo de valor soporte CBR .....	24
B.	Morfología de las alotropías de carbono y métodos de producción .....	25
C.	Metodología de diseño AASHTO 1993.....	26

1.	Diseño de pavimento asfáltico.....	26
a.	Cálculo del número estructural requerido (SNreq).....	30
b.	Cálculo número estructural (SN).....	32
1)	Primera parte de diseño: Número estructural actual (SNest-actual).....	33
a)	Coeficiente de aporte estructural (A):.....	33
b)	Coeficiente de drenaje (Cd):.....	36
c)	Espesor de la capa (H):.....	37
2)	Segunda parte de diseño: Número estructural sobrecapa (SNest-sc).....	37
2.	Diseño de pavimento de concreto hidráulico.....	38
3.	Análisis de utilización de alotropías de carbono en la mezcla de la superficie de rodadura flexible o rígida.....	42
V.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43
A.	Ensayos de laboratorio para muestra de subrasante.....	43
1.	Característica de la subrasante.....	46
B.	Resultados para el tránsito de diseño.....	47
C.	Resultados para el diseño de pavimento asfáltico.....	51
1.	Cálculo del número estructural requerido (SN req).....	52
2.	Medición de deformaciones para determinar el estado de serviciabilidad actual del pavimento.....	52
a.	Índice de serviciabilidad actual del pavimento (Pa).....	54
b.	Serviciabilidad y porcentaje de vida restante del pavimento.....	54
c.	Coeficiente de aporte estructural.....	55
3.	Cálculo del número estructural (SN est-actual):.....	56
4.	Cálculo del número estructural sobre capa (SN est-sc).....	56
D.	Resultados para el diseño de pavimento rígido.....	57
E.	Análisis de costos para sobre capa asfáltica y whitetopping de concreto.....	59
VI.	CONCLUSIONES.....	63
VII.	RECOMENDACIONES.....	65
VIII.	FUENTES.....	66
IX.	ANEXOS.....	69

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Estructura de diversos CNT pared simple y CNT pared múltiple.....	4
Ilustración 2. Generación de nanofibras de carbono método CVD.....	5
Ilustración 3: Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos expuestos a la carga vehicular .....	7
Ilustración 4. Número estructural .....	13
Ilustración 5. Tipos de ejes .....	16
Ilustración 6. Deflectómetro de impacto .....	18
Ilustración 7. Proyecto en ejecución para toma de muestra de subrasante.....	19
Ilustración 8. Número de tamices y clasificación de suelo.....	20
Ilustración 9. Tamaño de muestra para ensayo granulométrico .....	21
Ilustración 10. Ensayo de granulometría .....	21
Ilustración 11. Muestra de subrasante húmeda en cuchara casagrande.....	22
Ilustración 12. Límite plástico .....	23
Ilustración 13. Equipo utilizado para realizar ensayo CBR .....	24
Ilustración 14. Pesos y dimensiones vehiculares I .....	27
Ilustración 15. Pesos y dimensiones vehiculares II .....	28
Ilustración 16. Perfilómetro.....	34
Ilustración 17. CF y vida restante del pavimento .....	35
Ilustración 18. Capa estructurales del pavimento actual .....	37
Ilustración 19. Gráfica para módulo K.....	40
Ilustración 20. Ancho para carriles de diseño.....	42

## LISTA DE TABLAS Y GRÁFICAS

Tabla 1. Clasificación del suelo por diámetro de partícula .....	10
Tabla 2. Plasticidad y rango de índices de plasticidad .....	11
Tabla 3. Factor de distribución por carril .....	14
Tabla 4. Factor de de agresión por tipo de eje.....	15
Tabla 5. Índice de serviciabilidad inicial.....	16
Tabla 6. Índice de serviciabilidad final .....	16
Tabla 7. Factor de distribución por carril .....	26
Tabla 8. Factor de agresión (Fe).....	27
Tabla 9. Nivel de confiabilidad para cada tipo de carretera .....	30
Tabla 10. Desviación normal estándar (Zr).....	30
Tabla 12. Serviciabilidad inicial (Po).....	31
Tabla 13. Serviciabilidad final (Pf) .....	31
Tabla 14. Ecuaciones para coeficiente de aporte estructural.....	33
Tabla 15. Cuadro: Serviciabilidad y porcentaje de vida restante del pavimento .....	35
Tabla 16. Calidad de drenaje .....	36

Tabla 17. Características de drenaje .....	36
Tabla 18. Ecuación para coeficiente de aporte estructural de carpeta sobre capa.....	38
Tabla 19. Porcentaje de transferencia de cargas en losas de concreto hidráulico simple...	39
Tabla 20. Resultados para determinar LL .....	43
Gráfica 1. Porcentaje de humedad vs número de golpes (LL) .....	43
Tabla 21. Resultados límites de Atterberg.....	43
Tabla 22. Granulometría de la muestra de subrasante.....	44
Gráfica 2. Curva granulométrica de la muestra de subrasante .....	44
Tabla 23. Peso unitario seco y porcentaje de humedad de la muestra.....	45
Gráfica 3. Peso unitario seco vs porcentaje de humedad de la subrasante .....	45
Gráfica 4. Ensayo de valor soporte CBR a la subrasante .....	46
Tabla 24. Tránsito diario en la zona .....	47
Tabla 25. Tránsito de diseño y factores de tránsito FCa y Fd .....	47
Tabla 26. Fe por tipo de vehículo .....	48
Tabla 27. FeCG .....	49
Tabla 28. Datos y factores de diseño para el cálculo del Ndiario .....	50
Gráfica 5. Factor de proyección de tránsito.....	50
Tabla 29. Datos para el diseño del pavimento asfáltico .....	51
Tabla 30. Módulo de elasticidad de las capas estructurales del pavimento asfáltico.....	52
Tabla 30. Medición del IRI promedio .....	53
Gráfica 6. ÍRI.....	53
Tabla 31. Serviciabilidad actual del pavimento.....	54
Tabla 32. Coeficiente de aporte estructural .....	55
Tabla 33. Cálculo del número estructural actual (SN est-actual).....	56
Tabla 34. Cálculo del número estructural sobre capa (SN est-sc).....	56
Tabla 35. Cálculo del número estructural del pavimento (SN est).....	56
Tabla 36. Datos para el diseño de sobre capa de pavimento rígido.....	57
Tabla 37. Espesor de losa de sobre-capa para el pavimento rígido (Whitetopping) .....	58
Tabla 38. Volumen de concreto asfáltico en cada tipo de mezcla.....	59
Tabla 39. Ahorro económico en volumen de concreto asfáltico .....	59
Tabla 40. Masa de bitumen en la mezcla de concreto asfáltico .....	59
Tabla 41. Masa de CNF necesarias en mezcla de concreto asfáltico .....	59
Tabla 42. Volumen de concreto hidráulico en cada tipo de mezcla .....	60
Tabla 43. Ahorro económico en volumen de concreto hidráulico .....	61
Tabla 44. Masa de CNF necesarias en mezcla de concreto hidráulico.....	61
Gráfica 7. Ahorro en volumen de concreto asfáltico e hidráulico en proyectos de pavimentación con diferentes longitudes .....	62

## LISTA DE ABREVIATURAS

CNTF	Nano fibras y nanotubos de carbono
CNT	Nanotubos de carbono
CNF	Nano fibras de carbono
AASHTO	Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales
ASTM	American Society for Testing and materials
MIT	Instituto Tecnológico de Massachusetts
USDA	Departamento de agricultura de Estados Unidos
CBR	Ensayo California bearing ratio
CVD	Descomposición química fase vapor
MCDP	Manual Centroamericano para diseño de pavimentos
LL	Límite líquido
LP	Límite plástico
IP	Índice de plasticidad
SN	Número estructural
SNreq	Número estructural requerido
SNest-actual	Número estructural actual
SNest-sc	Número estructural sobre capa
H	Espesor de la capa estructural del pavimento
a	Coefficiente de aporte estructural
Cd	Coefficiente de drenaje
Zr	Desviación normal estándar
So	Error normal combinado
D	Espesor de losa del pavimento
Po	Índice de serviciabilidad inicial
Pf	Índice de serviciabilidad final
Pa	Índice de serviciabilidad actual
$\Delta$ PSI	Diferencial de índices de serviciabilidad
J	Factor de transferencia de carga
Sc	Módulo de ruptura

Mr	Módulo de resiliencia
Ec	Módulo de elasticidad
K	Módulo de reacción de la subrasante
TPD	Tránsito promedio diario
FCa	Factor de distribución por carril
Fd	Factor de distribución por sentido
Fe	Factor de agresión
FeCG	Factor de equivalencia global
ESAL	Ejes equivalentes – “Equivalent simple axial load”
IRI	Índice de regularidad internacional
NTG	Norma Técnica Guatemalteca
EIC	Escuela de ingeniería en construcción
USCS	Unified soil classification System
DGC	Dirección general de caminos
Ndiario	Número de ejes equivalentes diarios de 8.2 toneladas
Vc	Porcentaje de buses y camiones
R	Factor de crecimiento
Fp	Factor de proyección
R%	Nivel de confiabilidad
PVF	Porcentaje de vida final del pavimento
PVA	Porcentaje de vida restante del pavimento
PVI	Porcentaje de vida inicial del pavimento
CF	Factor de condición
MR600	Concreto para pavimentos con módulo ruptura 600 psi
CFB	Cemento estructural

## GLOSARIO

**Nanotecnología:** Ciencias y técnicas que se aplican al nivel de nano escala, es una medida extremadamente pequeña denominada “nano” ( $\times 10^{-9}$ ), que permite trabajar y manipular estructuras moleculares y sus átomos. (Maubert, M; Soto, L; León, A y Flores, J, 2012)

**Alotropías de carbono:** La alotropía es una propiedad que poseen los elementos químicos de presentarse bajo estructuras moleculares diferentes en el mismo estado físico. (Juanico, 2004)

**Carbono amorfo:** Formado por cristales irregulares, se puede presentar a diferentes grados de pureza y es caracterizado por poseer una estructura indefinida e irregular. (Sierra, 2008)

**Nanotubos de carbono:** Son formados por moléculas tubulares, presentan propiedades morfológicas, mecánicas y eléctricas excepcionales. (Juanico, 2004)

**Nano fibras de carbono:** Se forman por fibras nano estructuradas, poseen óptimas propiedades mecánicas, químicas, térmicas y eléctricas, dando como resultado propiedades mecánicas ventajosas para diferentes campos de aplicación. (Del Rio, 2011)

**Descomposición química fase vapor (CVD):** Consiste en un tubo de cuarzo encerrado en un horno, flujo de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) como fuente de carbono y un catalizador metálico (óxido de níquel, cobre o aluminio) para acelerar la reacción y producir las nanofibras o nanotubos de carbono. Este procedimiento se puede trabajar a presión atmosférica y con temperaturas entre  $700^\circ\text{C}$  a  $900^\circ\text{C}$ . (Juanico, 2004)

**Pavimento:** La estructura integral de las capas de sub-base, base y carpeta de rodadura colocada encima de la sub-rasante destinada a resistir las cargas dinámicas de los vehículos. En ingeniería de pavimentos se desarrollan dos tipos de pavimentos convencionales: flexibles y rígidos. Se refiere a pavimento flexible a los pavimentos con la carpeta o superficie de rodadura de concreto asfáltico y rígidos a la carpeta de pavimento de concreto hidráulico o adoquinado. (MCDP, 2002)

**Carpeta o superficie de rodadura:** La parte superior de un pavimento, el pavimento flexible o rígido que sostiene la circulación vehicular. (MCDP, 2002)

**Whitetopping:** Carpeta o sobrecapa de concreto hidráulico para pavimento rígido fundida in situ.

**Base:** Es la capa del pavimento cuyo espesor está diseñado y constituye a la estructura del pavimento. Su función es absorber la carga transmitida por la capa de rodadura y disiparla para que no afecte la sub-rasante. (MCDP, 2002)

**Subbase:** Capa de material seleccionado que se coloca sobre la sub-rasante. El objetivo de la sub-base es servir como drenaje de pavimento y eliminar cambios de volumen que se pueden producir en la sub-rasante. Es un material granular que evita la ascendencia de suelos finos. (Coronado, 2002)

**Subrasante:** Capa de terreno natural que soporta la estructura del pavimento. En un diseño de pavimento adecuado se extiende a profundidades donde no le afecta la carga de diseño de tránsito previsto. (MCDP, 2002)

**Agregado pétreo:** Se define como cualquier material mineral duro en forma de partículas fragmentadas que forman parte de un pavimento de mezcla asfáltica en frío o caliente. (Guevara, 2010)

**Material bituminoso:** Material cuyo origen son los crudos petrolíferos, sustancias de color negro sólidas o viscosas que se ablandan por el calor. También son obtenidos por la destilación destructiva de sustancias de origen carbonoso”. (Villatoro, 2013)

**Concreto hidráulico:** El concreto hidráulico es una combinación de cemento Portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos, para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente”. (NIT-SCT, México (2004)

**Concreto asfáltico:** El concreto asfáltico, también llamado como mezcla asfáltica, consiste en una combinación de agregados gruesos, finos y minerales, mezclados uniformemente en frío o caliente con cemento asfáltico y compactado en capas. (NIT-SCT, México (2004)

## RESUMEN

Esta investigación impulsa la nanotecnología aplicada a estructuras de la ingeniería civil, en este caso se elige una estructura de pavimento por el volumen de material utilizado, esto permite tener mayores beneficios empleando nano-materiales como modificadores. Como objetivo principal, se evalúan dos tipos de estructuras de pavimento con diferentes capas de rodadura, el primero con capa de rodadura de concreto asfáltico y el segundo con capa de rodadura de concreto hidráulico. Adicionalmente, se realiza la comparación en términos estructurales de ambas capas de rodadura modificadas con nanotubos y nano fibras de Carbono (CNTF) y las convencionales. Así mismo, se presenta un análisis de variabilidad en costos y durabilidad de los dos tipos de pavimentos para determinar si existe rentabilidad en el uso de nano materiales como modificadores de las mezclas.

Se hizo una investigación previa sobre la morfología y características físicas de los nanotubos y nano fibras de carbono para entender la influencia en las propiedades mecánicas de las mezclas convencionales. Luego de estudiar las características mecánicas de los materiales modificados, se procedió a la investigación de los métodos de producción o síntesis de los CNTF.

Para la síntesis de las alotropías de carbono se estudió el método de la descomposición catalítica del metano, el cual es un método económico y de baja energía que permite controlar variables de producción. Luego de conocer la teoría del método y el procedimiento de síntesis, también se estudió la posibilidad de utilizar nano fibras de carbono provenientes de los subproductos de la industria para la modificación, esto con el fin de optimizar costos de aplicación.

Con relación a la etapa de diseño, se desarrollaron cuatro diseños estructurales de pavimentos, dos con mezclas convencionales y dos con mezclas modificadas. La metodología de diseño se basó en las especificaciones de AASHTO 1993 agregando algunos parámetros mecanicistas como la medición de la serviciabilidad del pavimento con un perfilómetro inercial y el cálculo del módulo de pavimento combinado con el deflectómetro de impacto. El suelo de subrasante para el diseño se tomó en campo y se evaluó en laboratorio, se hizo un conteo de tránsito para calcular la carga en ejes equivalentes con una proyección de 20 años como vida útil del pavimento.

Se evaluó literatura para estudiar los beneficios que pueden tener las mezclas de concreto asfáltico en términos de módulos de elasticidad, ahuellamiento y fatiga, y concreto hidráulico en términos de módulo de ruptura y fatiga, siendo estas propiedades variables de ingreso para el diseño estructural, específicamente para aportes estructurales en cada capa del pavimento (Carpeta Asfáltica, Losa de Concreto, Base y Sub-base).

Conociendo la capacidad estructural de ambos tipos de pavimento (modificado y convencional), más el impacto de los materiales modificadores y su procedimiento de síntesis, se puede realizar la evaluación y análisis de ahorro y costos que puede generar la construcción de un pavimento modificado con CNTF, y además contar con los beneficios que se obtienen con el ambiente o con la producción de hidrógeno.

Así como se analizan los costos que se generan en la producción de las CNTF y el ahorro que presentan en la construcción de los pavimentos con mezclas modificadas, se puede enfatizar las ventajas que tienen las estructuras modificadas en términos de durabilidad y calidad del pavimento que son factores de evaluación complementarias a la rentabilidad inmediata.

# I. INTRODUCCIÓN

Debido a los avances que presenta la tecnología en la actualidad, se pretende iniciar la investigación para darle uso y aplicación a nuevos materiales en escala nano-métrica para mejorar las propiedades físico-mecánicas de las estructuras de la ingeniería civil.

Estas modificaciones en los materiales estructurales pueden mejorar el comportamiento de un conjunto de elementos estructurales, optimizando y aumentando la durabilidad de las estructuras. Cuando se escribe sobre el factor de optimización estructural se refiere a utilizar menos material de construcción y generar ahorro monetario, logrando que la estructura tenga la misma o mayor capacidad para contrarrestar cargas y tener mejor desempeño en términos de durabilidad. La afinidad del Bitumen y el Cemento con las CNTF ya tienen antecedentes en cambios de propiedades mecánicas por su interacción.

Las nanofibras de carbono se pueden encontrar en algunos subproductos de la industria, estos materiales se podrían aprovechar a muy bajos costos como modificadores de mezclas asfálticas o de concreto. Por este motivo, es importante buscar la aplicación correcta a estos subproductos industriales, implementar una metodología de recolección para las fibras y darles uso como modificador estructural dentro de un proyecto de reciclaje y mejora del medio ambiente.

Así como se optimizan las estructuras mediante el reciclaje de subproductos de la industria se puede mencionar que dentro de los objetivos de esta investigación se busca innovar en la aplicación nano materiales dentro de los materiales de la construcción, y con su aplicación ayudar a contrarrestar la evolución de las cargas.

Guatemala es un país en vías de desarrollo, caracterizado por poca investigación y conocimiento de sus características geotécnicas, en este trabajo se busca analizar la futura calibración de un diseño estructural para un pavimento con materiales modificados utilizando las condiciones geotécnicas y económicas de Guatemala.

Existen muchas investigaciones en el tema a escala macro, sin embargo, es de suma importancia conocer los materiales a escala nano y micro, ya que se pueden aprovechar las variables dentro de la matriz de un material combinado y obtener propiedades mecánicas mayores que las convencionales.

## II. OBJETIVOS

### A. Generales:

- Estudiar los beneficios de la modificación de las capas estructurales de un pavimento con nanotubos y nanofibras de carbono en términos de rentabilidad, optimización estructural y durabilidad.

### B. Específicos:

- Investigar la influencia de las características morfológicas de los nanotubos y nano fibras en las mezclas de concreto asfáltico e hidráulico para comparar las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto asfáltico e hidráulico modificadas con nanotubos y nanofibras de carbono y las mezclas convencionales.
- Estudiar las condiciones geotécnicas de un suelo de sub-rasante representativo de la ciudad de Guatemala, tomando una muestra de sub-rasante en campo y realizando diferentes estudios en la muestra: Granulometría, límites de Atterberg, ensayo de compactación próctor modificada y capacidad de soporte CBR.
- Realizar un diseño de pavimento para las estructuras modificadas y convencionales utilizando la metodología AASHTO 93, para determinar las variaciones que presentan los factores y resultados del diseño entre una estructura modificada y una convencional.
- Analizar los costos y beneficios de la modificación de nanotubos y nano fibras de carbono basado en el diseño estructural, tomando en cuenta el costo de inversión de los nanomateriales, el ahorro en concreto asfáltico o hidráulico de la capa de rodadura y las ventajas de la mezcla modificada.
- Estudiar las ventajas en términos de durabilidad que proveen los materiales modificados con nanotubos y nano fibras de carbono en una estructura de pavimento.

### III. MARCO TEÓRICO

#### A. Nanotecnología aplicada

La nanotecnología y nanociencia son técnicas que se aplican a una escala nano-métrica ( $1 \times 10^{-9}$ ), estas permiten controlar estructuras moleculares y la acomodación de sus átomos para maximizar propiedades de una matriz. Las aplicaciones a escala nanométrica permiten la posibilidad de fabricar materiales a partir del reordenamiento de sus átomos y moléculas. La nanotecnología se caracteriza por ser un campo aplicado en múltiples disciplinas y cohesionado exclusivamente por la escala de la materia con la que se trabaja. (Sierra, 2008)

El campo de la nanotecnología ha evolucionado en los últimos años, y es un progresivo campo de investigación. Los avances han generado alto impacto en campos de estudio como ciencia de los materiales, electrónica y medicina. (Mnyusiwalla, 2003)

Debido al desarrollo y avances científicos que han presentado los estudios a nivel global en el campo de la nanotecnología, se han logrado descubrir estructuras funcionales con dimensiones nanométricas. Estas estructuras funcionales han existido en la Tierra desde el origen de la vida y los estudios nanotecnológicos han ayudado al hombre a descubrirlos y generar nuevas aplicaciones. (Poole, 2003)

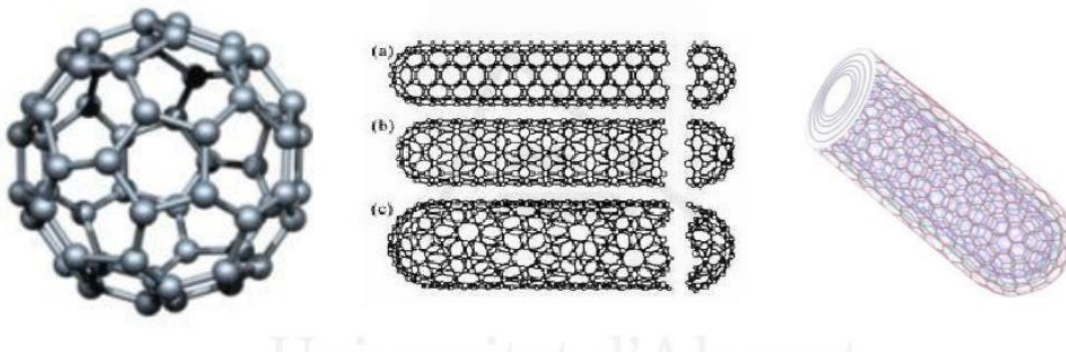
La alotropía es una propiedad que poseen los elementos químicos de presentarse bajo estructuras moleculares diferentes en el mismo estado físico. El Carbono puede encontrarse en la naturaleza en distintas formas alotrópicas, como carbono amorfo, grafito, diamante, hollín, fullerenos, nanotubos y nanofibras de carbono. Las diferentes alotropías pueden modificar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales mediante su estructura molecular. (Juanico, 2004)

El carbono amorfo, los nanotubos de carbono y nanofibras de carbono son una propiedad alotrópica del carbono. Cada una de estas propiedades alotrópicas son diferenciadas por su composición molecular, el carbono amorfo es caracterizado por poseer una estructura indefinida e irregular, los nanotubos de carbono son formados por moléculas tubulares y las nanofibras de carbono se forman por fibras nano estructuradas. Cada una de estas formas le brinda a cada alotropía de carbono diferentes propiedades físicas y mecánicas de acuerdo a su estructura molecular

A escala microscópica, el carbono amorfo no tiene estructura definida, se forma por diferentes cristales irregulares y se puede presentar a diferentes grados de pureza. En términos de materia y propiedades mecánicas no posee ventajas en resistencia y durabilidad. (Sierra, 2008)

Los nanotubos de carbono (CNT) presentan propiedades morfológicas, mecánicas y eléctricas excepcionales, permitiendo su aplicación en diversos campos, tanto en conductividad eléctrica como resistencia mecánica. Estos son una alotropía de carbono como el diamante, el grafito o fullerenos, su estructura está formada por moléculas tubulares. Los nanotubos de carbono, fueron descubiertos y desarrollados en 1991 por Sumio Iijima, el cual se encontraba trabajando con un microscopio en un laboratorio y determinó moléculas tubulares en el hollín formado por descargas de arco eléctrico, formando grafito. (Maubert, 2000)

**Ilustración 1. Estructura de diversos CNT pared simple y CNT pared múltiple**

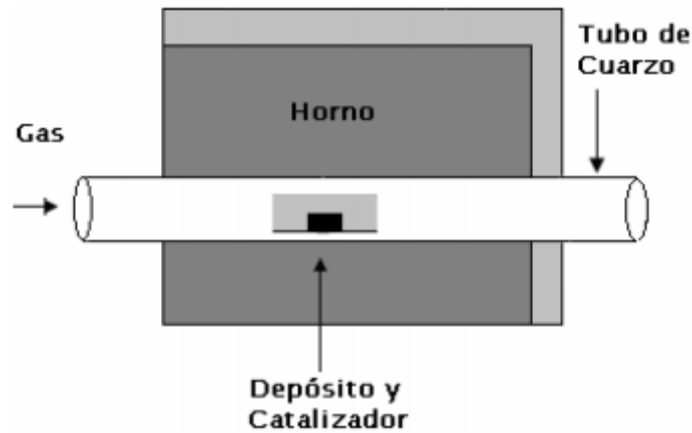


(Galao, 2012)

Las nano-fibras de carbono (CNF) son materiales nano-estructurados también designados como nano-filamentos de carbono o nano-fibras gráficas. Estos nano-materiales poseen óptimas propiedades mecánicas, químicas, térmicas y eléctricas, dando como resultado propiedades mecánicas ventajosas para diferentes campos de aplicación. Las nanofibras de carbono pueden producirse mediante la descomposición catalítica de un gas portador de átomos de carbono en diferentes metales de transición. (Del Rio, 2011).

Una de las metodologías de síntesis de CNFT es la Descomposición Química Fase Vapor (CVD), la cual se basa en la generación térmica de radicales activos desde un gas que conduce la película elemental. Este método puede producir CNFT de buena calidad a niveles bajos de energía, lo cual lo hace atractivo. Consiste en un tubo de cuarzo encerrado en un horno, flujo de gas metano ( $\text{CH}_4$ ) como fuente de carbono y un catalizador para acelerar la reacción. Este procedimiento se puede trabajar a presión atmosférica y con temperaturas entre  $700^\circ\text{C}$  a  $900^\circ\text{C}$ . La técnica consiste en colocar un tubo de cuarzo como reactor dentro de un horno a determinado rango de temperaturas por un tiempo definido e introducir gas metano que junto con un catalizador metálico (óxido de níquel, cobre y aluminio) se activará la reacción para la producción de alotropías de carbono. (Juanico, 2004)

## Ilustración 2. Generación de nanofibras de carbono método CVD



(Juanico, 2004)

Así mismo, las nanofibras de carbono también pueden ser obtenidas del subproducto de la industria. Según investigaciones científicas publicadas en la revista BBC mundo, científicos descubrieron cómo obtener nanofibras de carbono del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmósfera mediante reactores, generando un método más económico para la producción de nanofibras y se reducirían los niveles de dióxido de carbono en la atmósfera. (BBC, 2007)

### B. Ingeniería en pavimentos

Una carretera, calle o camino es un término que designa a una vía pública con fines de circulación y tránsito de vehículos de manera continua, que incluye la extensión total comprendida dentro del derecho de vía. (MCDP, 2002)

El diseño geométrico es un factor fundamental para el diseño de una carretera, debido a que a través de la configuración geométrica tridimensional se puede diseñar una vía funcional, segura y económica. Para que una carretera sea funcional, debe ofrecer adecuada movilidad a través de una suficiente velocidad de operación. La seguridad de una carretera se puede obtener con un diseño simple y uniforme. Para el diseño de pavimentación de una carretera, calle o camino se pueden tomar diferentes alternativas dependiendo el presupuesto económico, los principales pavimentos utilizados para la construcción de vías de transporte son los pavimentos flexibles y pavimentos rígidos.

Un pavimento es una superficie de rodadura para el paso de vehículos, formada por la integración de capas estructurales con diferentes materiales destinadas a transmitir las cargas aplicadas por el tránsito hacia el terraplén. Las capas estructurales (subbase, base y carpeta) colocadas sobre la subrasante son destinadas a sostener las cargas vehiculares y que se transmita la menor carga posible a la subrasante. (MCDP, 2002)

## 1. Capas estructurales de los pavimentos

**a. Subrasante.** La subrasante es, en esencia, el terreno natural que soporta la estructura de pavimento, la profundidad a la que se extiende la subrasante depende de la carga de diseño y tránsito previsto. La capa subrasante puede formarse en corte o relleno debidamente compactado.

La calidad del material de subrasante influye en gran parte en el espesor de pavimento, por lo que esta debe cumplir requisitos de resistencia, índices de expansión y contracción por humedad e incompresibilidad. Es importante que la subrasante se encuentre libre de vegetación y materia orgánica, si no es así, debe reemplazarse por un material adecuado. La subrasante debe compactarse, de forma que quede escarificada y mezclada homogénea para conformarse y compactarse según AASHTO T-180. (MCDP, 2002)

La norma del ensayo de compactación próctor modificado AASHTO T-180, regula los procedimientos para compactar materiales en laboratorio y determinar la relación de contenido de humedad y peso unitario seco.

**b. Subbase.** La sub-base es la primera capa estructural del pavimento sobre la subrasante, esta se utiliza tanto en pavimentos flexibles como en pavimentos rígidos. En pavimentos flexibles, esta capa de material funciona como material de transición colocado entre la subrasante y la base. La función principal de esta capa es aislar o proteger a las capas estructurales de mayor calidad de la filtración finos además de contrarrestar la carga transmitida por la base (capa superior). (MCDP, 2002)

Esta capa es utilizada como capa de drenaje y control de ascenso capilar de agua, de forma que protege la estructura de pavimento. Generalmente se utilizan materiales granulares para la conformación de la subbase, es importante que el material sea seleccionado y tenga mayor valor soporte que el material de subrasante, siempre tomando en cuenta las especificaciones de AASHTO con respecto a valor soporte y límites de consistencia. (MCDP, 2002)

**c. Base.** La base es la capa estructural del pavimento cuya función principal es transmitir y distribuir las cargas del tránsito a las capas estructurales inferiores (Subbase). Las bases especificadas para pavimentos pueden ser base común, base granular, base triturada o base estabilizada.

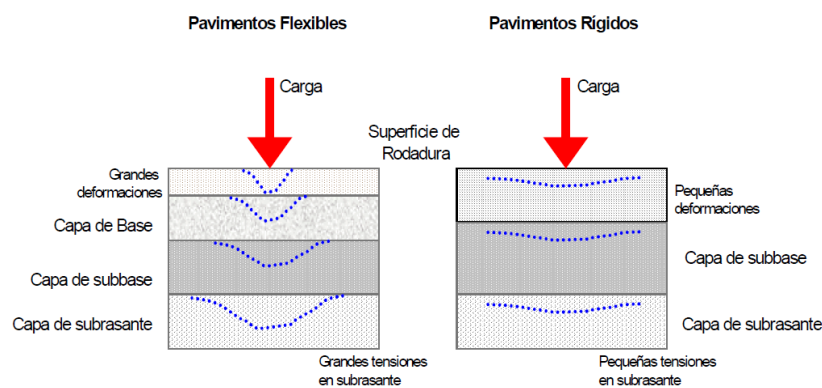
La base granular es caracterizada por ser un material de piedra triturada combinada con grava, arena y suelo en estado natural. La estabilidad de la base del pavimento depende la granulometría, densidad, cohesión, tamaño y forma de las partículas, estas diferentes propiedades mecánicas brindan a la base su característica física.

La base estabilizada es una capa conformada por piedra o grava triturada, mezclada con material de relleno y materiales estabilizadores. Los materiales estabilizadores, son productos preparados y construidos aplicando técnicas para mejorar sus condiciones de estabilidad y resistencia. De esta forma se logra construir una base que transmita y distribuya las cargas empleadas por el tránsito de diseño. Para construir las bases estabilizadas se utilizan los productos estabilizadores, algunos de los materiales utilizados como productos estabilizadores son el cemento portland, cal, material bituminoso y productos estabilizadores químicos y orgánicos en combinación con cemento, cal o material bituminoso. (MCDP, 2002). La base común consiste en un material natural sin proceso de trituración y la base triturada es un material con alto porcentaje de trituración.

**d. Carpeta o superficie de rodadura.** La superficie de rodadura de un pavimento es la capa rígida o flexible que soporta la circulación vehicular. El objetivo principal de esta carpeta es proteger la estructura del pavimento, evitando filtraciones de agua que saturen las capas inferiores. Esta capa ayuda a que no se transmita mayor carga dinámica a las capas inferiores provocada por el tránsito. (MCDP, 2002)

**2. Pavimento.** El pavimento es el conjunto integrado por las capas estructurales sobrepuestas encima de la subrasante destinada a resistir las cargas dinámicas de los vehículos. Los pavimentos se dividen en flexibles y rígidos, cada pavimento se comporta de manera diferente al momento que se le aplica la carga de tránsito. En un pavimento rígido, debido a la buena distribución en la superficie de rodadura se generan tensiones bajas en la subrasante. En un pavimento flexible, ocurre lo contrario, la superficie de rodadura es menos rígida, por lo que las deformaciones son mayores y se genera más tensión en la subrasante. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

### Ilustración 3: Comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos expuestos a la carga vehicular



(MCDP, 2002)

**a. Pavimento flexible.** El pavimento flexible está integrado por diferentes capas estructurales. Las estructuras que conforman el pavimento flexible es la capa de subbase, la base y la superficie de rodadura. La superficie de rodadura de los pavimentos flexibles consisten en capas bituminosas (Concreto asfáltico o dobles tratamientos). (MCDP, 2002)

**1) Capa asfáltica.** La capa asfáltica del pavimento flexible es denominada mezcla asfáltica o también mezcla de concreto asfáltico. Ésta consiste en una combinación de agregados gruesos, medios y finos controlados por una curva granulométrica mezclados uniformemente en frío o caliente con cemento asfáltico y compactado en capas. (NIT-SCT, México (2004)

**a) Mezcla asfáltica en frío.** La mezcla asfáltica en frío es una combinación de asfalto líquido con agregados pétreos (grava triturada) y arena que definen la estructura del pavimento. Esta composición asfáltica se realiza combinando las proporciones de agregados y asfalto según la mezcla de diseño. La mezcla asfáltica en frío se coloca y compacta a temperatura ambiente, sin necesidad de ser secado o previamente calentado. Este tipo de mezclas se utilizan por lo general en casos puntuales. (Guevara, 2010)

**b) Mezcla asfáltica en caliente.** Mezcla de agregados pétreos con materiales bituminosos, combinados en un proceso que implica calentar el agregado pétreo y la mezcla asfáltica, obteniendo altas temperaturas de mezclado y un grado de viscosidad para colocar el concreto asfáltico. (Zúñiga, 2015)

**c) Capas de protección.** Las capas de protección son un tratamiento superficial de mezcla asfáltica aplicada sobre la base o superficie del pavimento, su función principal es cubrir las estructuras del pavimento. Estas son capas en el pavimento que no aportan soporte a la estructura del pavimento, no superan espesores de 4 centímetros y su objetivo es preservar por un corto tiempo las bases estabilizadas. (Zúñiga, 2015)

Las capas de protección son tratamientos superficiales asfálticos denominados riegos y sellos asfálticos. Los riegos asfálticos son aplicados sobre la base del pavimento para darle un tratamiento superficial a las capas estructurales. Los riegos asfálticos pueden ser de diferente tipo dependiendo el agregado proporcionado en la mezcla utilizada. En algunos casos se utiliza la aplicación del bitumen sin agregados, otras opciones consisten en la aplicación una mezcla asfáltica (materiales bituminosos) con agregados pétreos triturados (arena o grava), que son compactados de forma densa. (Zúñiga, 2002)

Los sellos asfálticos consisten en la aplicación de una mezcla de material bituminoso (asfalto líquido) y agregado fino sobre la superficie de rodadura del pavimento flexible. Su objetivo principal es proteger la superficie asfáltica llenando vacíos, grietas e impermeabilizando la estructura del pavimento asfáltico. (MCDP, 2002)

**b. Pavimento rígido.** La estructura del pavimento rígido es una integración de la subbase y la superficie de rodadura. La superficie de rodadura de la estructura del pavimento rígido es construida con concreto hidráulico o adoquín, de forma que se distribuye mejor las cargas hacia su estructura del pavimento, obteniendo la rigidez del pavimento y un alto módulo de elasticidad.

Existen tres tipos de pavimento rígido: Concreto hidráulico sin refuerzo, concreto hidráulico de geometría optimizada, concreto hidráulico reforzado y concreto hidráulico reforzado continuo. Cada uno de estos varía dependiendo el diseño utilizado en la superficie de rodadura. (MCDP, 2002)

**1) Concreto hidráulico sin refuerzo.** La losa de la superficie del pavimento no contiene armadura, las juntas tienen un espaciamiento entre 2.50m a 4.50m. Agregar los dispositivos de transferencia de cargas en las juntas queda a criterio del diseñador. (MCDP, 2002)

**2) Concreto hidráulico reforzado.** El pavimento rígido de concreto hidráulico reforzado incluye armadura en la losa de la superficie de rodadura, controlando las fisuras por contracción y así mismo se pueden generar espaciamientos mayores entre las losas, entre 6.10 a 36.60 metros. (Cossi, 2001)

**3) Concreto hidráulico reforzado continuo.** Un pavimento rígido de concreto reforzado continuo no tiene juntas transversales, únicamente juntas frías debido al método de construcción. Este pavimento está diseñado con una armadura continua longitudinal. (Universidad de Piura, 2013)

### **C. Ensayos y evaluación de suelo subrasante**

La subrasante es el terreno o material de suelo natural que se prepara y compacta para soportar la estructura del pavimento. Es importante conocer las propiedades mecánicas del suelo subrasante para la elaboración de un pavimento. Para determinar las características físico-mecánicas de un suelo subrasante se debe clasificar el suelo mediante ensayos de laboratorio.

Las especificaciones de AASHTO indican que se debe clasificar el suelo mediante el ensayo de granulometría, límites de consistencia, equivalente de arena, compactación Proctor, valor soporte CBR y porcentaje de hinchamiento máximo. (MCDP, 2002)

**1. Granulometría.** La granulometría es la medición y graduación de una muestra de suelo conforme al tamaño de los granos y partículas de materiales sedimentarios, está determinada la abundancia de cada una de las partículas en relación al análisis de tamices de determinada escala granulométrica. (Giro, 1985)

El estudio de granulometría de un suelo consiste en sacudir una muestra de suelo a través de un conjunto de mallas o tamices con aberturas progresivamente más pequeñas para determinar la

masa de suelo retenido en cada una. Mediante el estudio granulométrico de la muestra de suelo se puede determinar y clasificar el tipo de suelo en grava, arena gruesa, fina, limo o arcilla.

La grava y arena son áridos sin cohesión, se forma por fragmentos de roca y minerales, su forma es angulada o redondeada. Las arenas y gravas se pueden diferenciar mediante el tamaño del grano de la partícula, en estado de humedad los granos de la arena se apelmazan debido a las tensiones capilares.

Los limos y arcillas son partículas microscópicas de origen mineral y orgánico, son diferenciados por el tamaño del diámetro de la partícula y sus propiedades físicas en estado seco y húmedo. Los limos y arcillas son suelos caracterizados por ser suelos finos con poca plasticidad y granulometría uniforme, procedentes de la descomposición de rocas, en estado seco son suelos firmes y en contenidos de humedad suelen ser plásticas.

**Tabla 1. Clasificación del suelo por diámetro de partícula**

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
MIT	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
USDA	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
AASHTO	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (limos y arcillas) < 0.075	

(Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

Para analizar una muestra en base al tipo de suelo se utiliza una curva granulométrica. La curva consiste en una representación gráfica de los resultados obtenidos en un ensayo de la granulometría de las partículas y granos de una muestra de suelo. En la ordenada se indica el porcentaje de peso que pasa cada tamiz y la abscisa el diámetro equivalente de las partículas en escala logarítmica. (Giro, 1985)

**2. Límites de Atterberg.** El ensayo de los límites de Atterberg determina el límite líquido y límite plástico de una muestra de suelo fino, generalmente limos o arcillas. El límite líquido (LL) es el porcentaje de contenido de agua por encima del cual un suelo pasa del estado plástico al estado líquido. El límite plástico (LP) es la frontera entre el estado plástico y estado semisólido de un suelo. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

Para determinar el límite líquido mediante el ensayo de límites de Atterberg se utiliza una cuchara Casagrande, en la cual se coloca la muestra de suelo en estado plástico, se realiza una ranura

trapezoidal de 12.7mm al medio de la muestra y se golpea consecutivamente, midiendo la cantidad de golpes necesarios para cerrar el surco, el límite líquido es el contenido de agua de la muestra necesario para cerrar el surco en 25 golpes.

El límite plástico de una muestra de suelo se determina mediante un método mecánico de enrollado, donde se determina el contenido de agua en la muestra en donde se pueden realizar rollos de 3.2mm de diámetro y luego se desmorona. El contenido de agua de una muestra de suelo es el porcentaje entre la diferencia de peso húmedo y peso seco. La diferencia entre el contenido de humedad en porcentaje del límite líquido y límite plástico es el índice de plasticidad del suelo.

#### **Ecuación 1. Porcentaje de humedad**

$$\text{Porcentaje de humedad} = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso Seco}} * 100$$

#### **Ecuación 2. Índice de plasticidad**

$$IP = LL - LP$$

**Tabla 2. Plasticidad y rango de índices de plasticidad**

<b>PLASTICIDAD</b>	<b>RANGO IP</b>	<b>CARACTERÍSTICA DEL SUELO</b>
NULA	0 a 3	Gravas, arenas, limo
MEDIA	4 a 15	Limo, arcilla no expansiva
ALTA	16 a 30	Limo arcilloso Arcilla (medianamente expansiva) limosa Arcillas y limos orgánicos
MUY ALTA	>31	Arcilla limosa Arcilla (altamente expansiva) cambios volumétricos importantes.

(Osorio, 2010)

**3. Ensayo de compactación Próctor modificado.** El ensayo de compactación Próctor es una técnica de aplicación en laboratorio de mecánica de suelos para estudiar la compactación de un terreno, determinando el porcentaje de humedad óptimo para encontrar el peso específico seco máximo de compactación del suelo. (ASTM D1557)

Hay dos ensayos de compactación Próctor, la prueba de compactación estándar y el ensayo Próctor modificado, cada uno de estos se diferencia por la energía utilizada para realizarlo, en el ensayo Próctor estándar utiliza un martillo de compactación de 2.50 kg y cae a una altura de 304.80mm y el ensayo Próctor modificado utiliza un martillo pistón de 4.53 kg y tiene una altura de caída de 457.2 mm; ambos utilizan 5 capas de compactación con 25 golpes. (ASTM D1557)

4. **Ensayo de valor soporte CBR.** El ensayo de valor soporte California (CBR, AASHTO T-193) mide la resistencia a corte que presenta un suelo a la penetración de un pistón con determinada área. El índice de resistencia, también denominado valor soporte del suelo se determina mediante la medición de la fuerza necesaria para que un pistón penetre la muestra de suelo en determinados intervalos. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

#### D. Metodología de diseño AASHTO 1993

1. **Metodología de diseño AASHTO 1993 para pavimentos flexibles.** El método de diseño AASHTO 1993 para pavimentos asfálticos, se basa en la determinación de un número estructural (SN) para el pavimento. El número estructural del pavimento debe ser capaz de soportar el nivel de carga de tránsito que se requiere en el diseño.

Este método incluye diferentes factores y consideraciones de diseño como índices de confiabilidad, drenaje, serviciabilidad y módulos de resistencia de los materiales que conforman la estructura del pavimento. (Sánchez, 2012)

El número estructural para el diseño del pavimento flexible es una cifra que representa la resistencia del pavimento en función al espesor de la capa, coeficiente estructural y coeficiente de drenaje. Para determinar el número estructural de la estructura del pavimento se utiliza la siguiente ecuación:

#### Ecuación 3. Número estructural

$$SN = \sum H_i * a_i * Cd_i$$

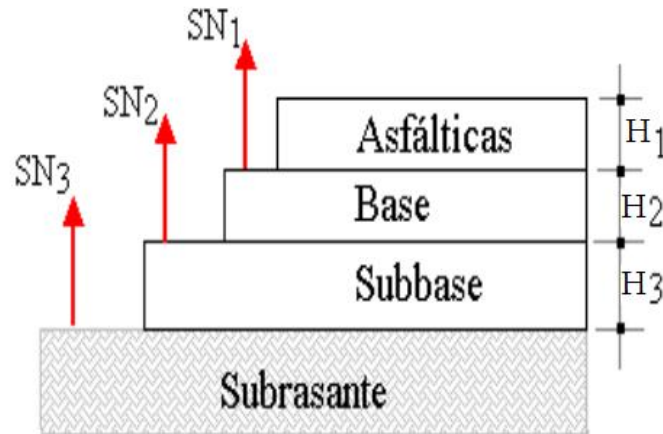
Donde:

H: Espesor de la capa estructural del pavimento

a: Coeficiente de aporte estructural

Cd: Coeficiente de drenaje

#### Ilustración 4. Número estructural



(Sánchez, 2012)

**2. Metodología de diseño AASHTO 1993 para pavimentos rígidos.** La metodología de diseño AASHTO-93 para pavimentos rígidos involucra diferentes factores de carga, tránsito, drenaje, confiabilidad, serviciabilidad del pavimento y propiedades físicas, tanto de la subrasante como del concreto para la losa. (Universidad de Piura, 2013)

La ecuación para el diseño de pavimentos rígidos de AASHTO es:

#### Ecuación 4. Cálculo para espesor de losa en pavimento rígido

$$\log_{10}(N) = Z_R + S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32Pt) \times \log_{10}\left(\frac{(S'c)(Cd)(D^{0.75} - 1.132)}{215.63(J)(D^{0.75} - \frac{18.42}{(\frac{Ec}{K})^{0.25}})}\right)$$

Donde:

N: Número de ejes equivalentes (W18)

Zr: Desviación normal estándar

So: Error normal combinado

D: Espesor de losa del pavimento (in)

$\Delta$ PSI: Diferencial de índices de serviciabilidad

Pt: Nivel de serviciabilidad final

Sc: Módulo de ruptura (psi)

Cd: Coeficiente de drenaje

J: Factor de transferencia de carga

Ec: Módulo de elasticidad del concreto (psi)

K: Módulo de reacción de la subrasante (lb/in<sup>3</sup>)

(AASHTO, 1993)

### E. Aplicación y diseño: Proyecciones de tránsito, módulos y coeficientes estructurales

Para aplicar la metodología AASHTO 1993 para el diseño de pavimentos flexibles y rígidos es necesario el análisis de los niveles de tránsito, factores de carga y determinar el número de ejes equivalentes (ESAL) de diseño.

**1. Tránsito promedio diario (TPD).** Para diseñar la estructura de un pavimento flexible o rígido, es necesario conocer el número de vehículos que transitan por el punto de diseño. Para determinar el número de vehículos transitados en una zona se realizan aforos y estudios de volúmenes de tránsito. (Lobo, 2007)

El TPD es el número de vehículos, de cualquier tipo, que transitan en un punto de la vía durante un día. El tránsito promedio diario se determina mediante un promedio diario de los vehículos contabilizados en el aforo y estudio de volumen de tránsito. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

El TPD es una variable fundamental para determinar el número de ejes equivalentes que solicite el diseño del pavimento. Por motivos de seguridad en diseño es importante realizar los aforos del tránsito del área durante diferentes períodos en el año. (Higuera, 2011)

#### 2. Factores de diseño de tránsito

**a. Factor de distribución por carril (FCa).** El factor de distribución por carril corrige el número de vehículos en cada dirección. Este se define con base al número de carriles en cada sentido.

**Tabla 3. Factor de distribución por carril**

NÚMERO DE CARRILES EN CADA DIRECCIÓN	PORCENTAJE DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 TONELADAS EN EL CARRIL DE DISEÑO	FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL (FCa)
1	100	1
2	80-100	0.80 – 1
3	60-80	0.60 – 0.80
4	50-75	0.50 – 0.75

(AASHTO, 1993)

**b. Factor de distribución por sentido (Fd).** Para la mayoría de las carreteras el factor de distribución por sentido se define generalmente como el cincuenta por ciento debido a un flujo equivalente en ambas direcciones de cada sentido. El factor de distribución por sentido (Fd) se define directamente por el comportamiento del flujo de tránsito en cada sentido de la vía. (Higuera 2011)

**c. Factor de agresión (Fe).** El factor de agresión (Fe), también es denominado factor de equivalencia de carga por tipo de vehículo. El factor (Fe) representa la cantidad de veces que carga un eje equivalente de 8.2 toneladas por cada vez que pasa un tipo de vehículo considerado. Para determinar el factor de agresión se utilizan unas formulas simplificadas dependiendo la configuración y el tipo de eje del vehículo. (Higuera 2011)

**Tabla 4. Factor de de agresión por tipo de eje**

TIPO DE EJE	FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR (Fe)
Simple de rueda simple	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{6.6}\right)^4$
Simple de rueda doble	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{8.2}\right)^4$
Tándem	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{15}\right)^4$
Tridem	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{23}\right)^4$


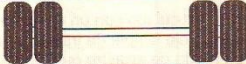
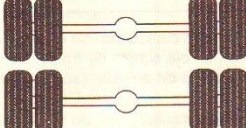
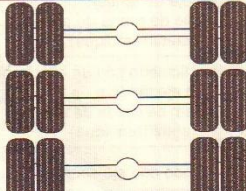
(INVIAS, 1998)

**3. Ejes equivalentes (ESAL).** Los ejes equivalentes, también denominados ESAL “Equivalent simple axial load”, son el número de ejes que equivalen a una carga de 80 kN o 18 kips. Los ESAL son el resultado de la transformación del tránsito mixto compuesto por diferentes vehículos con variación de peso y ejes. (Guevara, 2003)

**a. Tipos de ejes.** La clasificación de un vehículo se realiza con base la configuración de los ejes que presente. Dependiendo la función y las cargas los vehículos pueden presentar diferentes ejes:

- Eje simple direccional
- Eje simple con llanta doble
- Eje tándem con llanta doble
- Eje trídem con llanta doble

**Ilustración 5. Tipos de ejes**

DESCRIPCIÓN	CONFIGURACIÓN	PESO, TONELADAS
Eje simple direccional		6,0
Eje simple llanta doble		11,0
Eje tándem llanta doble		22,0
Eje tridem llanta doble		24,0

(Higuera, 2011)

**4. Serviciabilidad del pavimento.** El índice de serviciabilidad del pavimento indica una evaluación del deterioro o confort de la carpeta o superficie de rodadura del pavimento. Los índices de serviciabilidad varían dependiendo el tipo de pavimento o vía.

**Tabla 5. Índice de serviciabilidad inicial**

TIPO DE PAVIMENTO	SERVICIABILIDAD INICIAL ( $P_o$ )
Concreto	4.5
Asfalto	4.2

(AASHTO, 1993)

**Tabla 6. Índice de serviciabilidad final**

TIPO DE VÍA	SERVICIABILIDAD FINAL ( $P_f$ )
Autopista	2.5 - 3.0
Carreteras	2.0 - 2.5
Zonas industriales	
Pavimento urbano principal	1.5 - 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 - 2.0

(AASHTO, 1993)

**a. Índice de regularidad Internacional (IRI).** El índice de regularidad internacional (IRI), también es conocido como el índice internacional de rugosidad, utilizado para medir el deterioro del pavimento mediante la operación de un perfilómetro. El perfilómetro es un equipo sofisticado montado sobre un vehículo que se pasa sobre una superficie de pavimento y mide los altibajos en las deformaciones del pavimento provocado por las cargas a través del tiempo de uso. La suma promedio de los altibajos es el IRI y está expresado en [m/km] o [in/mi]. (MCDP, 2002)

## 5. Módulos y resistencia de los materiales

**a. Módulo de ruptura (Sc).** El módulo de ruptura es la resistencia a la flexión, se mide a través de ensayos de vigas con carga aplicadas a una distancia de L/3 de su apoyo (ASTM C78). (Carmona y Pedraza, 2009)

**b. Módulo resiliente (Mr).** Módulo que relaciona los esfuerzos aplicados y la recuperación de las deformaciones. Relaciona la magnitud de esfuerzo desviador cíclico en comprensión triaxial y la deformación recuperable. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

**c. Módulo de elasticidad (E).** El módulo de elasticidad es una propiedad física de un cuerpo que relaciona el esfuerzo y la deformación de un material bajo un estado de carga y descarga. El módulo de elasticidad es una medida de tenacidad y rigidez expresada en el sistema internacional en (N/m<sup>2</sup>) o en el sistema inglés en (lb/in<sup>2</sup> ó psi). (Esinger, 2007).

**d. Módulo de reacción de la subrasante (K).** El módulo de reacción de subrasante K [F/L<sup>3</sup>] está definido como:

### Ecuación 5. Módulo (K)

$$K = \frac{\sigma}{\delta}$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo normal

$\delta$  = deformación en dirección del esfuerzo

(Gonzales, 1993)

**1) Deflectómetro de impacto.** Es una herramienta geofísica que aplica por lo general una carga que equivale a medio eje equivalente de AASHTO, esta carga transmite ondas que son registradas con deformaciones por 7 deformímetros en una longitud de 1.80 metros. Esta herramienta permite retro-calcular el módulo de pavimento equivalente y con este dato el módulo de reacción de subrasante K como variable de ingreso para una sobrecapa asfáltica o de concreto hidráulico.

### Ilustración 6. Deflectómetro de impacto



(Sevicasa, 2012)

**6. Fatiga y ahuellamiento – Servicio y términos de durabilidad.** Debido a las condiciones de servicio, los pavimentos son susceptibles a dos fenómenos principales: fatiga y ahuellamiento. La exposición a fatiga y ahuellamiento en pavimentos se genera debido a las cargas y condiciones climáticas por sus condiciones de servicio que definen la durabilidad del pavimento. Debido a estos dos factores se generan las fallas en las capas de rodadura del pavimento.

El daño por fatiga es un factor crítico que afecta la serviciabilidad de un pavimento, tanto flexible como rígido. La fatiga es un estado de tensión que se genera por la repetición de cargas en el pavimento, provocando el agotamiento en el material y generando fisuras. (Monsalve, Giraldo y Gaviria, 2012)

El pavimento rígido está sujeto a daños principalmente por fatiga, los pavimentos flexibles se ven afectados por fatiga y ahuellamiento. El fenómeno de ahuellamiento consiste en el deterioro por acumulación de deflexiones en la capa asfáltica debido a las cargas y condiciones climáticas a las que está sometido el pavimento. El ahuellamiento está relacionado principalmente con la propiedad de resiliencia de una material, al perderse la resiliencia se acumulan deformaciones plásticas. (Roca y Visbal, 2013)

## IV. METODOLOGÍA

### A. Toma de muestra de suelo subrasante

Para iniciar el proceso de investigación, se programó una visita de campo a un proyecto ubicado en el kilómetro 9.4 carretera al Salvador. El proyecto consistía en la construcción de un paso a desnivel. De esta manera se aprovechó la oportunidad que se había realizado un corte de terreno en el medio de la carretera de forma que se lograra extraer una muestra de subrasante en un punto representativo, a una profundidad de tres metros por debajo del nivel del pavimento.

#### Ilustración 7. Proyecto en ejecución para toma de muestra de subrasante



Para extraer la muestra de subrasante, se utilizó herramienta y equipo adecuado para estudio de suelos, tomando las medidas y metodologías apropiadas para extraer la muestra de forma que se lograra mantener sus características originales *in situ*. Se extrajo una muestra equivalente a dos sacos de 46 kilogramos cada uno para así obtener resultados confiables.

**1. Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos para la muestra de subrasante.** Se dejó la muestra secando al sol durante un día. Después se realizó un cuarteo de la muestra hasta obtener una muestra representativa de 800 gramos para realizar el ensayo de granulometría.

**a. Ensayo de granulometría**

- Norma Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 41010-H1
- AASHTO T-27 Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos
- ASTM D422-63 Método de análisis del tamaño de las partículas del suelo

La finalidad del ensayo granulométrico es obtener la distribución por tamaño de las partículas en determinada muestra de suelo. Este análisis es utilizado en bases o sub-bases de carreteras para criterios de aceptación y en sub-rasantes para clasificación. Para definir la distribución del tamaño de las partículas del suelo se emplean tamices normalizados y numerados:

**Ilustración 8. Número de tamices y clasificación de suelo**

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm.)	Abertura real (mm.)	Tipo de suelo
3 "	80	76,12	} GRAVA
2 "	50	50,80	
1 1/2 "	40	38,10	
1 "	25	25,40	
3/4 "	20	19,05	
3/8 "	10	9,52	} ARENA GRUESA
N° 4	5	4,76	
N° 10	2	2,00	} ARENA MEDIA
N° 20	0,90	0,84	
N° 40	0,50	0,42	
N° 60	0,30	0,25	} ARENA FINA
N° 140	0,10	0,105	
N° 200	0,08	0,074	

(EIC, 2001)

Para realizar el ensayo es necesario un juego de tamices normalizados según normativa AASHTO o USCS, balanzas universales con precisiones de 1 gr a 0.1 gr, horno de secado con circulación de aire y temperatura y un vibrador mecánico. Como primer paso se debe homogenizar la muestra en estado natural, evitando separar sus partículas si se trata de materiales blandos, arenas compactadas o materiales similares. Luego se debe secar la muestra a temperatura ambiente o en el horno.

Para determinar la cantidad mínima de la muestra a ensayar se debe clasificar según el tamaño máximo de las partículas expresado en la siguiente tabla:

### Ilustración 9. Tamaño de muestra para ensayo granulométrico

Tamaño máximo de partículas (mm.)	Cantidad mínima a ensayar (kgs.)
5	0,50
25	10,0
50	20,0
80	32,0

(EIC, 2001)

Para iniciar el ensayo granulométrico se ensayó la muestra de subrasante seca a través de los tamices 3/4", 3/8", No. 10, 40, 100 y 200, y se vibró durante 5 a 10 minutos. Después de realizar la vibración de la muestra se registró el peso del material retenido en cada tamiz.

### Ilustración 10. Ensayo de granulometría



De acuerdo con los valores de los pesos retenidos en cada tamiz se continuó realizando los cálculos del ensayo. Se registró el porcentaje retenido en cada uno de los tamices, porcentajes retenidos acumulados, porcentaje que pasa cada tamiz y finalmente se graficó la curva granulométrica, donde la ordenada es el porcentaje de peso que pasa cada tamiz y la abscisa el diámetro equivalente de las partículas en escala logarítmica. A partir de esta gráfica se pueden determinar porcentajes de grava, arenas, arcillas o limos de la muestra.

**b. Ensayo de límites de Atterberg**

- ASTM D4318-00 Liquid limit, Plastic limit, and Plasticity Index of Soils

Para trabajar este ensayo se utilizó el método de cuchara Casagrande, un acanalador Casagrande con normativa ASTM de calibre 1 cm, un plato de porcelana y estufa de gas para secar la muestra.

Se colocó la muestra de suelo en un plato de porcelana agregándole suficiente agua destilada hasta lograr una pasta homogénea. Se alisó la superficie con la espátula de forma que la altura obtenida de la muestra en el centro sea de 10 mm y se ocupe una masa de 16 cm<sup>3</sup>. Luego de preparar la muestra se separó en dos partes con el acanalador a una separación de 63 mm, si había desprendimiento de la muestra en el fondo del plato de porcelana, se repetía el procedimiento. Logrando dejar el surco en el plato de la porcelana se continuó girando la manivela de la cuchara Casagrande con una frecuencia de 2 golpes por segundo y se contó el número de golpes necesarios hasta que se cerraba la ranura en 10mm de longitud.

**Ilustración 11. Muestra de subrasante húmeda en cuchara casagrande**

Finalmente, se tomó una muestra del material en el fondo del surco y se determinó el peso húmedo de la muestra. Con el material restante en el plato se mezcló de nuevo con agua destilada y se repitió el procedimiento para obtener tres o más puntos que varíen en un rango de 15 a 35 golpes. Para determinar el límite plástico se tomó el peso de cada muestra húmeda con los diferentes golpes realizados y posteriormente se secó cada una de ellas con la estufa de gas y una hoaya. Se pesó cada muestra para determinar el peso seco de cada una de ellas y así se determinó el contenido de agua. El

límite líquido se obtuvo mediante la relación del contenido de agua de la muestra y el peso seco de la muestra.

Para determinar el límite plástico de la muestra se utilizó un procedimiento simple, tomando varias muestras del suelo húmedo, se realizaban rollos o cilindros con la mano hasta llegar al grosor de 3mm. En este procedimiento no se tenía que desarmar o disgregarse la muestra mientras se llegaba al grosor. Teniendo varias muestras se determinó su peso húmedo, luego se secó la muestra en una hoyo con la estufa de gas y se determinó el contenido de agua de la muestra. El límite plástico se determinó al igual que el límite líquido con la relación del peso húmedo de la muestra y el peso seco.

### Ilustración 12. Límite plástico



Posteriormente, se determinó el índice de plasticidad mediante la diferencia entre el límite líquido y límite plástico.

#### c. Ensayo de compactación proctor modificado (porcentaje de humedad óptima y densidad máxima)

- ASTM D1557-12 Standard test methods for laboratory compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort

Se pasó una muestra de subrasante de 3 kilogramos a través del tamiz No.4. Se colocó la muestra con un contenido de agua seleccionado en determinado molde con dimensiones conocidas y se compactó en cinco capas. Cada capa se compactó con 25 golpes de un martillo de 44.5 N (10lb), que se dejó caer desde una altura de 18 pulgadas o 457 mm dándole un esfuerzo de compactación de 2700kN/m<sup>2</sup>. Se determinó el peso seco resultante. Este procedimiento se repitió agregándole un porcentaje de agua adicional, de esta manera se logró determinar suficientes contenidos de agua en la muestra de suelo para establecer una relación entre contenido de agua para suelo y peso unitario seco.

Finalmente, se graficaron los resultados en una relación curvilínea llamada curva de compactación, donde se determinan el contenido óptimo de agua y peso unitario seco máximo.

**d. Ensayo de valor soporte CBR**

- ASTM D1883-07 Standard Test Method for CBR of Laboratory-Compacted Soils

Se llevó a cabo el método del ensayo CBR para evaluar la capacidad de soporte de una muestra de subrasante. Este método se realizó con un grado de humedad y densidad conocido de la muestra.

Para hacer el ensayo CBR se utilizó un equipo de carga de penetración con indicador de carga adaptado, un molde cilíndrico de metal rígido con diámetro interior de 6 pulgadas y una altura de 7 pulgadas, un collar, plato base, disco espaciador y un pistón metálico de penetración. Se contaba con un equipo apropiado de medición como balanza y aparato para medir la expansión del material, tamices y una estufa de gas para secar las muestras.

**Ilustración 13. Equipo utilizado para realizar ensayo CBR**

Para llevar a cabo el ensayo se tamizó la muestra de subrasante de forma que si todo el material pasaba el tamiz de  $\frac{3}{4}$ ", se podía utilizar esta muestra para realizar el procedimiento, si alguna parte de la muestra queda retenida en el tamiz de  $\frac{3}{4}$ ", esta misma cantidad de material se debe sustituir por lo que quedó retenido entre el tamiz de  $\frac{3}{4}$ " al número 4.

Luego de que se pasó la muestra por el juego de tamices se tomó una muestra de 5 kilogramos y se añadió la cantidad de agua necesaria para realizar el ensayo con un grado de humedad de la muestra. Posteriormente se compactó la muestra de suelo en cinco capas compactada con 56 golpes

dentro del molde, se removió el collar, se removió el material sobrante y se desmontó el molde para colocarlo en posición inversa y medir el hinchamiento durante cuatro días.

Luego se procedió al ensayo de penetración, se colocó la muestra y se instaló el equipo de penetración, donde se aplicó una carga inicial de 10 libras y luego se aplicó una carga de penetración de 0.05 pulgadas por minuto, registrando las cargas de penetración de 0.025, 0.05, 0.075, 0.10, 0.125, 0.150, 0.175, 0.20, 0.30, 0.40 y 0.50 pulgadas. Finalmente, luego de realizar el ensayo de penetración se midió el contenido de humedad de la muestra.

De esta forma se determinó el porcentaje de hinchamiento máximo y el CBR de compactación de la muestra de subrasante.

## **B. Morfología de las alotropías de carbono y métodos de producción**

Después de realizar las pruebas a la muestra de sub-rasante se continuó con la investigación en base a búsqueda de información mediante bibliografía sobre las alotropías de carbono. Se realizó una búsqueda en estudios con respecto a la morfología de los nanotubos y nano fibras de carbono, y así también se estudió la influencia de esta morfología de los nano materiales en las propiedades mecánicas del asfalto y concreto hidráulico. Según (Martínez, 2014), a mayor diámetro y menor longitud las nanofibras de carbono son más resistentes, para concluir estos resultados se utilizó una microscopía de Barrido Electrónico TEM, en donde se lograron medir diferentes muestras. Por medio de variación de catalizadores de NiCuAl se determinaron diferentes morfologías de nanofibras. Las nanofibras con mayor diámetro y menor longitud como modificadoras obtuvieron los mejores resultados con respecto a propiedades mecánicas de las mezclas.

Se continuó el proceso de investigación mediante el estudio de la metodología de síntesis más rentable para la producción de nano fibras y nanotubos de carbono. Después de investigar diferentes metodologías y analizar las ventajas, desventajas y procesos de producción de cada una de éstas, se determinó cuál método es factible para la producción de alotropías de carbono. Determinando la metodología más rentable se continuó con el análisis entre la producción de esta metodología contra el método de obtener los nanotubos y nano fibras de carbono del subproducto de la industria. Se tomaron en cuenta factores como costos de producción, disponibilidad del material como subproducto de la industria, porcentajes de modificación, durabilidad y calidad del material. Se investigaron procesos de síntesis que pudieran controlar la forma de las fibras de carbono para obtener mejores resultados en los módulos de los materiales a evaluar. También se evalúa la obtención de estos materiales modificadores por medio del subproducto de la industria o mediante agentes contaminantes para el medio ambiente.

### C. Metodología de diseño AASHTO 1993

**1. Diseño de pavimento asfáltico.** Para realizar el diseño de un pavimento asfáltico, de primero, es necesario determinar la cantidad de ejes equivalentes (ESAL). Para determinar los ejes equivalentes en un diseño de pavimento entran en combinación una serie de factores y ecuaciones.

Se inició el proceso determinando el TPD de la zona. El tránsito es un parámetro de diseño fundamental para determinar los espesores de las capas del pavimento. En la investigación del tránsito, de forma simultánea al TPD, se realizó la clasificación de los tipos de vehículos y el porcentaje que circula por el área.

Conociendo la tabla con el tipo de vehículo y su tránsito diario en el lugar se continuó la metodología de diseño del pavimento, calculando dos factores: el factor del carril más cargado (FCa) y el factor de distribución por sentido (Fd) determinado dependiendo el sentido la carga. El factor Fd en la mayoría de carreteras es del 50%, este depende del comportamiento del sentido de cargas de la carretera.

El factor FCa se determinó con base al siguiente cuadro:

**Tabla 7. Factor de distribución por carril**

<b>NÚMERO DE CARRILES EN CADA DIRECCIÓN</b>	<b>PORCENTAJE DE EJES EQUIVALENTES DE 8.2 TONELADAS EN EL CARRIL DE DISEÑO</b>	<b>FACTOR DE DISTRIBUCIÓN POR CARRIL (FCa)</b>
1	100	1
2	80-100	0.80 – 1
3	60-80	0.60 – 0.80
4	50-75	0.50 – 0.75

(AASHTO, 1993)

Luego se procedió a calcular el factor de agresión (Fe) y un factor de equivalencia Global (FeCG). Para realizar este cálculo fue necesario conocer el tipo de vehículo y la carga de los ejes de cada vehículo. Para determinarlo se utilizó la siguiente ecuación para cada tipo de eje:

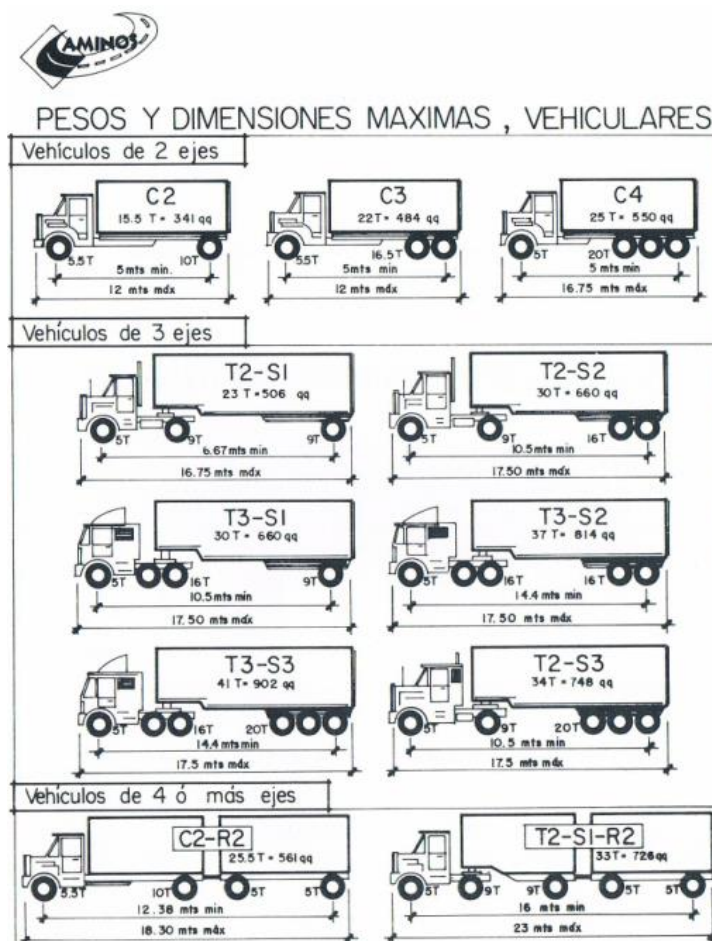
**Tabla 8. Factor de agresión (Fe)**

TIPO DE EJE	FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR (Fe)
Simple de rueda simple	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{6.6}\right)^4$
Simple de rueda doble	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{8.2}\right)^4$
Tándem	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{15}\right)^4$
Tridem	$\left(\frac{\text{Carga del eje (ton)}}{23}\right)^4$

(INVIAS, 1998)

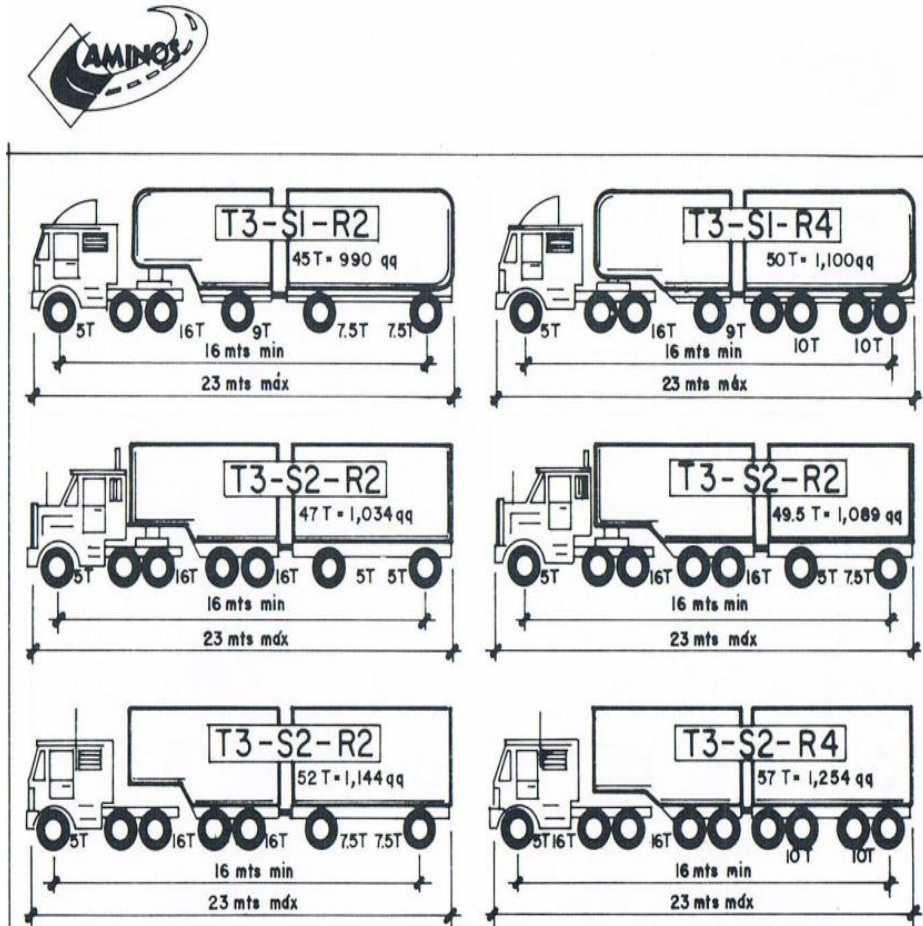
Para calcular Fe por cada tipo de vehículo se calculó la sumatoria de cada factor de equivalencia por cada eje del vehículo. Para determinar las cargas de cada eje se utilizaron las siguientes tablas, donde se puede conocer el peso que se aplica en cada eje y el tipo de eje.

**Ilustración 14. Pesos y dimensiones vehiculares I**



(DGC, 2007)

### Ilustración 15. Pesos y dimensiones vehiculares II



(DGC, 2007)

Posteriormente, para determinar el factor de equivalencia global (FeCG) se clasificó por porcentajes el tipo de vehículo transitado en el área, y se sumó la multiplicación del factor de agresión del tipo de vehículo y el porcentaje de tránsito del vehículo.

#### Ecuación 6. Factor de equivalencia Global (FeCG)

$$FeCG = \sum (Fe) * (\%transitado)$$

Luego de calcular el factor de equivalencia global se determinó el número de ejes equivalentes diarios de 8.2 Toneladas en el carril de diseño ( $N_{diario}$ )

### Ecuación 7. Ndiario

$$N_{DIARIO} = (TPD) * (Fd) * (FCa) * (Vc) * (FeCG)$$

Donde:

TPD – Tránsito promedio diario

Fd – Factor de distribución de cargas por sentido

FCa – Factor del carril más cargado

FeCG – Factor de equivalencia global

Vc – Porcentaje de buses y camiones

Para continuar el cálculo de los ejes equivalentes del diseño de pavimento se realizó una proyección del crecimiento de tránsito en el lugar. Para esto fue necesario determinar un factor de crecimiento (R) y el período de diseño (n) para calcular el factor de proyección de ejes equivalentes diarios (Fp):

### Ecuación 8. Factor de proyección

$$Fp = \frac{(1 - R)^n - 1}{\ln(1 + R)}$$

Finalmente, para calcular los ESAL para el diseño del pavimento se utiliza la siguiente ecuación:

### Ecuación 9. Cálculo de ESAL

$$(ESAL)W_{18} = 365 * (TPD) * (Vc) * (FeCG) * (Fd) * (FCa) * (Fp)$$

Donde:

TPD – Tránsito promedio diario

Fd – Factor de distribución de cargas por sentido

FCa – Factor del carril más cargado

FeCG – Factor de equivalencia global

Vc – Porcentaje de buses y camiones

Fp – Factor de proyección de ejes equivalentes diarios

a. **Cálculo del número estructural requerido (SNreq).** Conociendo el número de ejes equivalentes para el período de diseño del pavimento se procedió con el cálculo del número estructural requerido (SNreq). Para calcular el número estructural del pavimento requerido fue necesario determinar una serie de factores e índices de diseño.

Iniciando, se determinó un nivel de confianza (R%) para otorgar una medida de seguridad en el proceso de diseño. Para determinar este factor de confianza se utilizó el siguiente cuadro:

**Tabla 9. Nivel de confiabilidad para cada tipo de carretera**

TIPO DE CARRETERA	NIVEL DE CONFIABILIDAD, (R%)	
	Urbana	Interurbana
Autopistas y carreteras importantes	85.00 – 99.90	80.00 – 99.00
Arterias principales	80.00 – 99.00	75.00 – 95.00
Colectoras	80.00 – 95.00	75.00 – 95.00
Locales	50.00 – 80.00	50.00 – 80.00

(AASHTO, 1993)

Conociendo el nivel de confiabilidad (R%), se calculó un valor de desviación normal estándar (Zr). La desviación normal estándar se determinó con el siguiente cuadro, donde se define en base al valor del nivel de confiabilidad (R%) sugerido anteriormente:

**Tabla 10. Desviación normal estándar (Zr)**

CONFIABILIDAD, (R%)	DESVIACIÓN NORMAL ESTÁNDAR, (Zr)
50	0.000
60	-0.253
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

(AASHTO, 1993)

Para continuar el proceso del diseño del pavimento se tomó en cuenta el error normal combinado ( $S_o$ ), este factor toma en cuenta los errores de diseño como diferencias en variabilidad de la subrasante, variación en el tránsito de diseño o calidades de construcción. Este factor de error varía en cada diseño de pavimento y está determinado mediante el siguiente cuadro:

**Tabla 11. Error normal combinado ( $S_o$ )**

PROYECTO DE PAVIMENTO	ERROR NORMAL COMBINADO, ( $S_o$ )
Rango para pavimentos flexibles	0.40-0.50
Construcción nueva	0.45
Sobrecapas	0.50

(AASHTO, 1993)

Luego, se determinaron los índices de serviciabilidad del pavimento: serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y serviciabilidad final ( $P_f$ ). Estos índices varían dependiendo el tipo de pavimento, y son determinados mediante el siguiente cuadro:

**Tabla 12. Serviciabilidad inicial ( $P_o$ )**

TIPO DE PAVIMENTO	SERVICIABILIDAD INICIAL ( $P_o$ )
Concreto	4.5
Asfalto	4.2

(AASHTO, 1993)

**Tabla 13. Serviciabilidad final ( $P_f$ )**

TIPO DE VÍA	SERVICIABILIDAD FINAL ( $P_f$ )
Autopista	2.5 - 3.0
Carreteras	2.0 – 2.5
<b>Zonas industriales</b>	
Pavimento urbano principal	1.5 – 2.0
Pavimento urbano secundario	1.5 – 2.0

(AASHTO, 1993)

Después de conocer los valores de los índices de serviciabilidad del pavimento se puede determinar la diferencia de los índices de serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y final ( $P_f$ ), ( $\Delta IPS$ ):

**Ecuación 10.  $\Delta IPS$**

$$\Delta IPS = P_o - P_f$$

Por último, antes de calcular el número estructural requerido, es necesario conocer el módulo de resiliencia de la subrasante ( $M_r$ ). Para realizar el cálculo del módulo resiliente se utilizó el valor soporte de compactación al 95% obtenido en el ensayo CBR.

#### **Ecuación 11. Módulo Resiliente de subrasante**

$$M_r \text{ (psi)} = \text{CBR}(95\%) * 100 * 14.2$$

En la aplicación el módulo de resiliencia ( $M_r$ ) se utilizó un factor de seguridad, calculando el valor del módulo mediante la fórmula y tomando como máximo un valor resiliente ( $M_r$ ) de 12,000 psi (Lb/pulg<sup>2</sup>).

Para determinar el número estructural requerido ( $SN_{req}$ ) para el diseño del pavimento se utilizó la siguiente ecuación:

#### **Ecuación 12. Ecuación AASHTO 1993 para pavimento flexible**

$$\log(N) = Z_r \times S_r + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \left( \frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1904}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 \times \log(M_r) - 8.07$$

Para despejar la variable ( $SN$ ) se utilizó un programa de cálculo, de forma que se ingresaron los valores de las variables y se determinó el número estructural requerido ( $SN_{req}$ ).

**b. Cálculo número estructural ( $SN$ ).** El diseño del pavimento se dividió en dos partes, en la primera sección de diseño se determinó un valor del número estructural actual ( $SN_{est-actual}$ ), donde se utilizaron los valores del estado actual del pavimento para determinar su situación actual y en la segunda parte se determinó un número estructural con base en la aplicación de una sobrecapa ( $SN_{est-sc}$ ) con dos alternativas, una sobrecapa con mezcla asfáltica convencional y otra sobrecapa con mezcla asfáltica modificada con nanofibras de carbono.

La finalidad de calcular un número estructural actual ( $SN_{est-actual}$ ) y un número estructural de sobrecapa ( $SN_{est-sc}$ ) se hizo para que la suma de estos dos números estructurales cumpla siendo mayor al número estructural requerido ( $SN_{req}$ ).

#### **Ecuación 13. Relación número estructural actual y sobre capa**

$$SN_{req} < SN_{est}$$

$$SN_{est} = SN_{est-actual} + SN_{est-sc}$$

**1) Primera parte de diseño: Número estructural actual (SNest-actual).** Para el cálculo del número estructural del pavimento actual (SNest-actual) se tomaron en cuenta módulos de elasticidad de capas de base y sub-base granulares convencionales. Para la carpeta del pavimento asfáltico en el diseño inicial, se tomó en cuenta el módulo de elasticidad (E) de una mezcla asfáltica convencional densa en caliente.

Para el cálculo del número estructural de diseño se utilizó la siguiente ecuación:

**Ecuación 14. Número estructural para diseño pavimentos flexibles**

$$SN = \sum H_i * a_i * Cd_i$$

Donde:

H: Espesor de la capa estructural del pavimento

a: Coeficiente de aporte estructural

Cd: Coeficiente de drenaje

**a) Coeficiente de aporte estructural (A):**

El coeficiente de aporte estructural (A), se determinó mediante una ecuación para cada capa de diseño del pavimento flexible (Carpeta, base, subbase):

**Tabla 14. Ecuaciones para coeficiente de aporte estructural**

Coeficiente de aporte estructural	
Carpeta	$A_1 = 0.0029(E_1)^{0.486}$
Base	$A_2 = 0.249 \log(E_2)^{-0.689}$
Subbase	$A_2 = 0.227 \log(E_3)^{-0.577}$
<i>Módulo elasticidad (E<sub>n</sub>): [kg/cm<sup>2</sup>]</i>	

Para representar la situación actual del pavimento en el diseño, se utilizó un perfilómetro, en donde se recorrió por más de un kilómetro en la carretera al Salvador en el área del tramo diseñado, y se midieron las deformaciones para determinar el estado de serviciabilidad actual del pavimento.

### Ilustración 16. Perfilómetro



Con el perfilómetro se determinó el IRI, el cual mide la irregularidad del pavimento y aporta información para determinar su estado de servicio. Para calcular el índice de serviciabilidad actual del pavimento ( $P_a$ ) se utilizó la siguiente ecuación:

#### Ecuación 15. Serviciabilidad actual del pavimento

$$P_a = 7.1 - (2.19 * IRI^{0.5})$$

IRI – [m/km]

Con el valor del índice de serviciabilidad actual del pavimento ( $P_a$ ) determinado, y conociendo los valores de serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y final ( $P_t$ ) se procedió a realizar la interpolación para conocer el porcentaje de vida restante del pavimento, tomando en cuenta el 100% de vida restante con el índice de serviciabilidad inicial ( $P_o$ ) y el 0% de vida restante con el índice de serviciabilidad final ( $P_t$ )

**Tabla 15. Cuadro: Serviciabilidad y porcentaje de vida restante del pavimento**

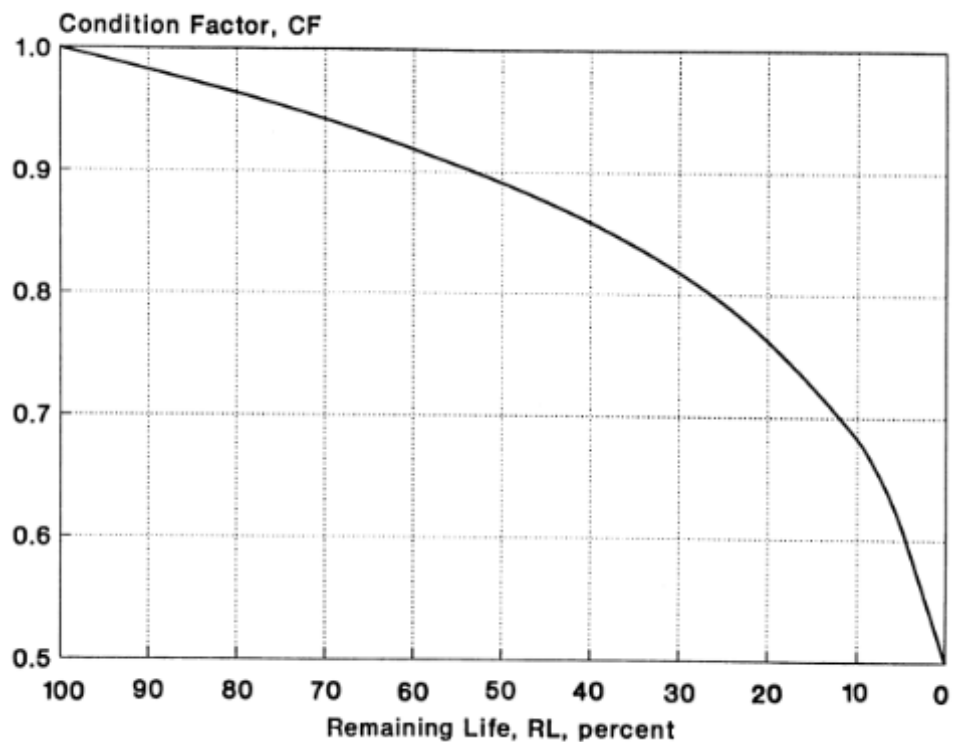
	<b>Índice de serviciabilidad</b>	<b>Porcentaje de vida restante del pavimento</b>
<b>Serviciabilidad final</b>	Pt	Porcentaje vida final (PVF%)
<b>Serviciabilidad actual</b>	Pa	Porcentaje vida restante del pavimento (PVA%)
<b>Serviciabilidad inicial</b>	Po	Porcentaje de vida inicial (PVI%)

**Ecuación 16. Porcentaje de vida restante del pavimento**

$$PVA\% = PVF\% + \frac{Pa - Pt}{Pt - Po} (PVI\% - PVF\%)$$

Calculando el valor de porcentaje de vida restante del pavimento, se utilizó la gráfica para determinar el factor de condición (CF), el cual ayudó a simular el diseño para las condiciones actuales del pavimento afectando el valor del coeficiente de aporte estructural actual:

**Ilustración 17. CF y vida restante del pavimento**



(AASHTO, 1993)

**Ecuación 17. Ecuación del coeficiente de aporte estructural actual**

$$A_{n-act} = A_n * CF$$

Donde:

An-act – Coeficiente de aporte estructural actual

An – Coeficiente de aporte estructural

CF – Factor de condición

**b) Coeficiente de drenaje (Cd):**

El coeficiente de drenaje (Cd) es variable en cada capa estructural del pavimento flexible, depende de las características del material y su drenaje; por lo que se determinó el valor del coeficiente de drenaje en base al porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento se ve expuesta a niveles de saturación.

**Tabla 16. Calidad de drenaje**

<b>CALIDAD DEL DRENAJE</b>	<b>TIEMPO QUE TARDA EL AGUA EN SER EVACUADA</b>
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Pobre	1 mes
Muy malo	El agua no evacua

(AASHTO, 1993)

**Tabla 17. Características de drenaje**

<b>CARACTERÍSTICAS DEL DRENAJE</b>	<b>Porcentaje de tiempo que la estructura del pavimento está expuesta a grados de humedad próximos a la saturación</b>			
	<b>Menos del 1%</b>	<b>1 – 5%</b>	<b>5 – 25%</b>	<b>Más del 25%</b>
Excelente	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Bueno	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Pobre	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Muy malo	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

(AASHTO, 1993)

**c) Espesor de la capa (H):**

El espesor de cada capa del pavimento, base subbase y carpeta, se determinó en campo mediante la medición de cada una de ellas. Se realizó un corte en el terreno, en sección transversal del pavimento por lo que se lograron determinar estas medidas.

**Ilustración 18. Capa estructurales del pavimento actual**



**2) Segunda parte de diseño: Número estructural sobrecapa (SNest-sc).** Para el diseño de la carpeta de sobrecapa asfáltica se tomaron en cuenta dos módulos de elasticidad, el mismo módulo de la mezcla densa en caliente convencional y un módulo de elasticidad para una mezcla densa en caliente modificada con nanofibras de carbono.

El valor del módulo de elasticidad de la mezcla modificada fue obtenido de una investigación relacionada con la aplicación de nano tubos de carbono para el mejoramiento de la carpeta asfáltica: “Nanotubos de carbono para el mejoramiento de la mezcla asfáltica MDC-2 y del asfalto colombiano 60/70”, que afirma que con la aplicación de nanotubos de carbono en mezclas de concreto asfáltico se puede aumentar el módulo de elasticidad de la mezcla de concreto asfáltico para las carpetas de pavimento en un 53%, utilizando un peso de nanotubos del 2% del peso de bitumen en la mezcla. (Rubio y Martínez, 2014)

El coeficiente de aporte estructural para la carpeta asfáltica que se utilizó para el diseño de la sobrecapa fue calculado mediante la ecuación del coeficiente de aporte estructural sin verse afectado por el CF.

**Tabla 18. Ecuación para coeficiente de aporte estructural de carpeta sobre capa**

Coeficiente de aporte estructural	
Carpeta	$A_1 = 0.0029(E_1)^{0.486}$
<i>Módulo elasticidad (<math>E_n</math>): [kg/cm<sup>2</sup>]</i>	

El coeficiente de drenaje (Cd) se determinó en base al mismo criterio que la primera parte del diseño para calcular el número estructural actual (SNest-actual).

Para determinar el número estructural de la sobre capa (SNest-sc) se propuso un espesor de la capa estructural del pavimento ( $H_n$ ) convencional y modificada, de tal forma se realizaron varias iteraciones en un programa de cálculo hasta que se cumpliera que la suma del número estructural actual y el número estructural de la sobre capa fueran mayor que el número estructural requerido.

**Ecuación 18. Condición para cumplir con el valor de número estructural**

$$SN_{est} = SN_{est-actual} + SN_{est-sc}$$

$$SN_{req} < SN_{est}$$

**2. Diseño de pavimento de concreto hidráulico.** Para el diseño de pavimento de concreto hidráulico se utilizó la misma información de tránsito que el diseño de pavimento flexible, conociendo el TPD de la zona, la clasificación de vehículos, los factores de equivalencia de carga para cada tipo de vehículo se relacionaron los mismos factores de diseño, el factor del carril más cargado (FCa), el factor de distribución por sentido de la carga (Fd), factor de agresión (Fe), factor de equivalencia global (FeCG) y se aplicó la misma ecuación de proyección, por lo tanto se diseñó con el mismo número de ESAL, en proyección a la cantidad de años de servicio del diseño.

Conociendo el valor de ejes equivalentes se procedió diseñar el pavimento de concreto hidráulico. Para esto fue necesario determinar un nivel de confianza (R%), desviación normal estándar ( $Z_r$ ) y error normal combinado ( $S_o$ ) utilizando el mismo método que el pavimento flexible, por lo tanto se utilizó el mismo factor de confianza (R%), desviación normal estándar ( $Z_r$ ) y error normal combinado ( $S_o$ ) en pavimentos rígidos que en flexibles.

Luego, se determinó el  $P_o$  y el  $P_f$  para pavimentos rígidos. El  $P_o$  de un pavimento de concreto varía con respecto al de un pavimento flexible, en cuanto el  $P_t$  depende del tipo de vía, por lo que no cambia entre cada tipo de pavimento.

Luego de determinar los valores de los índices de serviciabilidad del pavimento rígido, se determinó el  $\Delta IPS$ , utilizando el mismo procedimiento que en los pavimentos flexibles

Para el diseño del pavimento rígido se aplicó un valor de coeficiente de drenaje ( $C_d$ ), este factor depende directamente del porcentaje de tiempo de exposición del pavimento a niveles de saturación, por lo que no hay variación entre el coeficiente de drenaje del pavimento rígido y flexible.

Así mismo, se tomó en cuenta, que para el diseño del pavimento rígido se utilizó un diseño de concreto hidráulico simple, presentando juntas entre las losas del pavimento. Para este caso, se calculó el factor de transferencia de carga ( $J$ ) mediante la siguiente tabla de porcentajes de transferencias de carga.

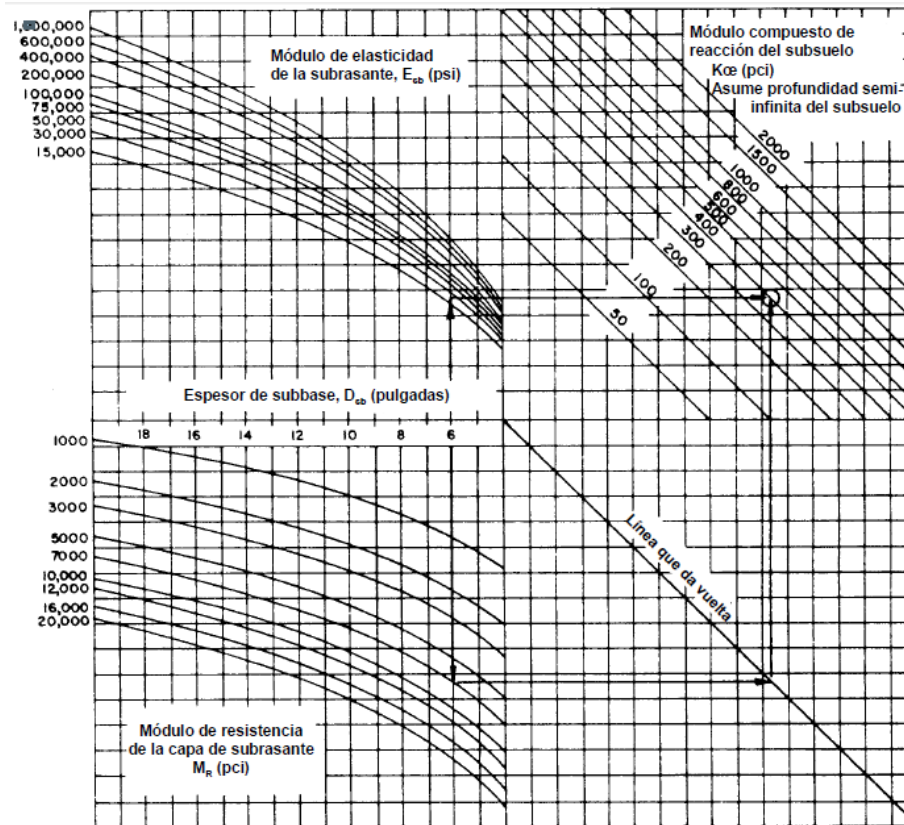
**Tabla 19. Porcentaje de transferencia de cargas en losas de concreto hidráulico simple**

Porcentaje de transferencia	J
< 50%	4
Entre 50% y 70%	3.5
> 70%	3.2

(AASHTO, 1993)

Posteriormente, se determinó un módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ). Para determinar el módulo ( $K$ ) fue necesario calcular el módulo combinado de pavimento ( $E_p$ ), que en base a los resultados presentados por el deflectómetro, se calculó mediante ecuaciones de retro análisis de AASHTO. De esta forma, conociendo el valor del  $E_p$ , el espesor de la carpeta de subbase rígida y el módulo de resiliencia de la capa de subrasante ( $M_r$ ), se determinó el módulo de reacción de la subrasante ( $K$ ) mediante la siguiente gráfica:

**Ilustración 19. Gráfica para módulo K**



(MCDP, 2002)

Luego de haber definido el tránsito del área y los factores de diseño, se incorporó un módulo de ruptura ( $S_c$ ). El módulo de ruptura está relacionado directamente con el tipo de mezcla de concreto, por lo que se definió una mezcla de concreto con asesoría de personal certificado de Mixto Listo, estableciendo un concreto para pavimento MR600 con resistencia a la flexión de 600psi [41kg/cm<sup>2</sup>].

Para calcular el módulo de elasticidad del concreto ( $E_c$ ), se utilizó una ecuación que relaciona el módulo de elasticidad en base al módulo de ruptura definido anteriormente.

**Ecuación 19. Módulo de ruptura del concreto (AASHTO, 1993)**

$$S_c = 43.5 \frac{E_c}{10^6} + 488.5$$

Donde:

$S_c$  - Módulo de ruptura (psi)

$E_c$  - Módulo de elasticidad (psi)

Para realizar el diseño del whitetopping del pavimento rígido se tomó en cuenta dos módulos de ruptura ( $S_c$ ) para las mezclas de concreto, el primer módulo ( $S_c$ ) fue convencional de una mezcla de concreto MR600 y otro módulo de ruptura ( $S_c$ ) modificado en base a la mezcla de concreto MR600 modificada CNT o CNF.

El valor del módulo de ruptura ( $S_c$ ) de la mezcla modificada fue obtenido en base a una investigación relacionada con el “Comportamiento mecánico y la microestructura de los materiales compuestos de cemento que incorporan múltiples superficies de nanotubos de carbono” que afirma que al utilizar un peso equivalente del 1% al 2% del peso de cemento en una mezcla de concreto con nano fibras de carbono, puede aumentar el módulo de ruptura del concreto ( $S_c$ ) en un 27%, y por lo tanto el módulo de elasticidad también aumentaría en base al cálculo de la ecuación 19. (Li, Wang, Zhao, 2005).

De esta forma se determinó un módulo de elasticidad del concreto modificado en utilizando la ecuación 18 con el valor del módulo de ruptura ( $S_c$ ) modificado.

Para finalizar el diseño se determinó el espesor de losa ( $D$ ) mediante la siguiente ecuación:

**Ecuación 20. Cálculo espesor de losa pavimento de concreto hidráulico (AASHTO, 1993)**

$$\log_{10}(N) = Z_R + S_o + 7.35 \times \log_{10}(D + 1) - 0.06 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32Pt) \times \log_{10}\left(\frac{(s'c)(Cd)(D^{0.75} - 1.132)}{215.63(J)(D^{0.75} - \frac{18.42}{(\frac{E_c}{K})^{0.25}})}\right)$$

Donde:

N: Número de ejes equivalentes ( $W_{18}$ )

Zr: Desviación normal estándar

So: Error normal combinado

D: Espesor de losa del pavimento (in)

$\Delta PSI$ : Diferencial de índices de serviciabilidad

Pt: Nivel de serviciabilidad final

$S_c$ : Módulo de ruptura (psi)

Cd: Coeficiente de drenaje

J: Factor de transferencia de carga

$E_c$ : Módulo de elasticidad del concreto (psi)

K: Módulo de reacción de la subrasante (lb/in<sup>3</sup>)

Se utilizó un programa de cálculo para despejar la variable D, y determinar el espesor de la losa del pavimento de concreto hidráulico.

**3. Análisis de utilización de alotropías de carbono en la mezcla de la superficie de rodadura flexible o rígida.** Después de realizar el diseño de cada pavimento (rígido y flexible) se desarrolló una comparación del costo del concreto asfáltico o hidráulico para la construcción de la superficie de rodadura entre un pavimento convencional y un pavimento modificado con alotropías de carbono, tomando en cuenta las mismas propiedades del suelo y condiciones de servicio.

Para realizar la comparación del costo del volumen de concreto para la superficie de rodadura se definió un tramo de un kilómetro de cuatro carriles (dos carriles por vía), con un ancho por carril mínimo definido en base al tipo de vía, según la tabla.

**Ilustración 20. Ancho para carriles de diseño**

Tipo de vía	Condición	Anchura
Autopistas y autovías	$V_p > 100$	3,75 m
Carreteras convencionales y vías rápidas	$80 < V_p < 100$	3,50 m
Vías de escaso tráfico de vehículos	$V_p < 40$ $IMD < 2.000$	3,00 m
Carreteras de montaña	Requiere gran movimiento de tierras	
Vías arteriales y calles urbanas		
Vías locales urbanas de más de 2 carriles por sentido		2,75 m
Vías locales urbanas que sirvan a menos de 200 viviendas		2,50 m

(Bañón, 2005)

Luego de comparar el costo entre la construcción del pavimento convencional y el pavimento modificado con alotropías de carbono, se analizaron las posibles metodologías de producción de alotropías de carbono. Determinando la factibilidad de producción y utilización en el diseño.

Así mismo, se analizaron las ventajas en términos de durabilidad y calidad de un pavimento modificado con alotropías de carbono contra un pavimento convencional.

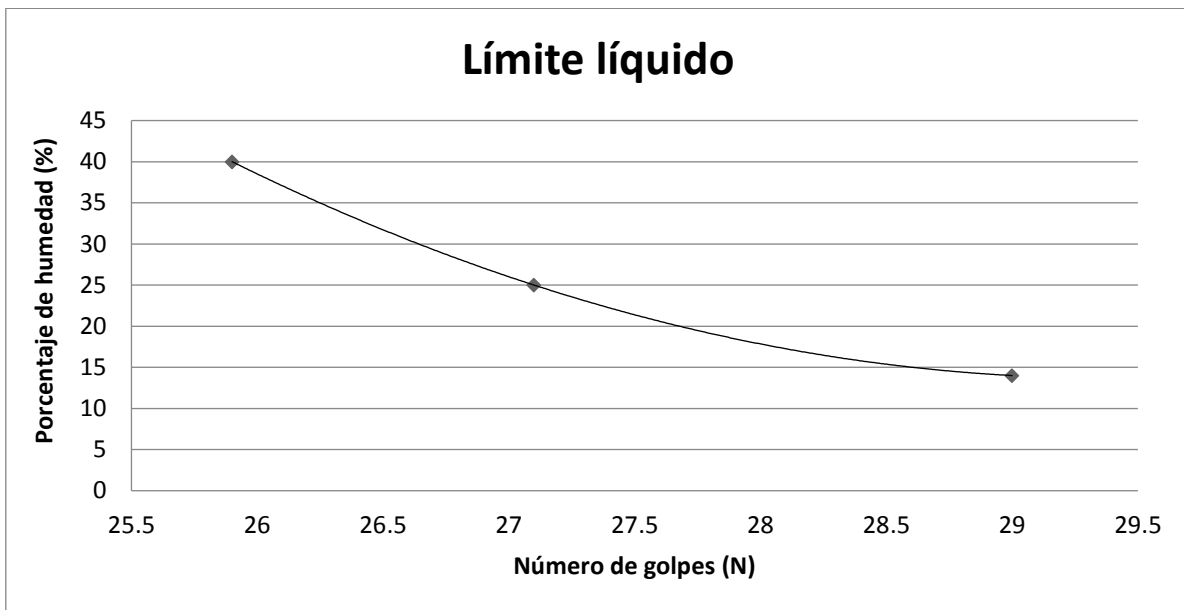
## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### A. Ensayos de laboratorio para muestra de subrasante

**Tabla 20. Resultados para determinar LL**

Porcentaje de humedad (%)	Número de golpes (n)
29.00	14
27.10	25
25.90	40

**Gráfica 1. Porcentaje de humedad vs número de golpes (LL)**



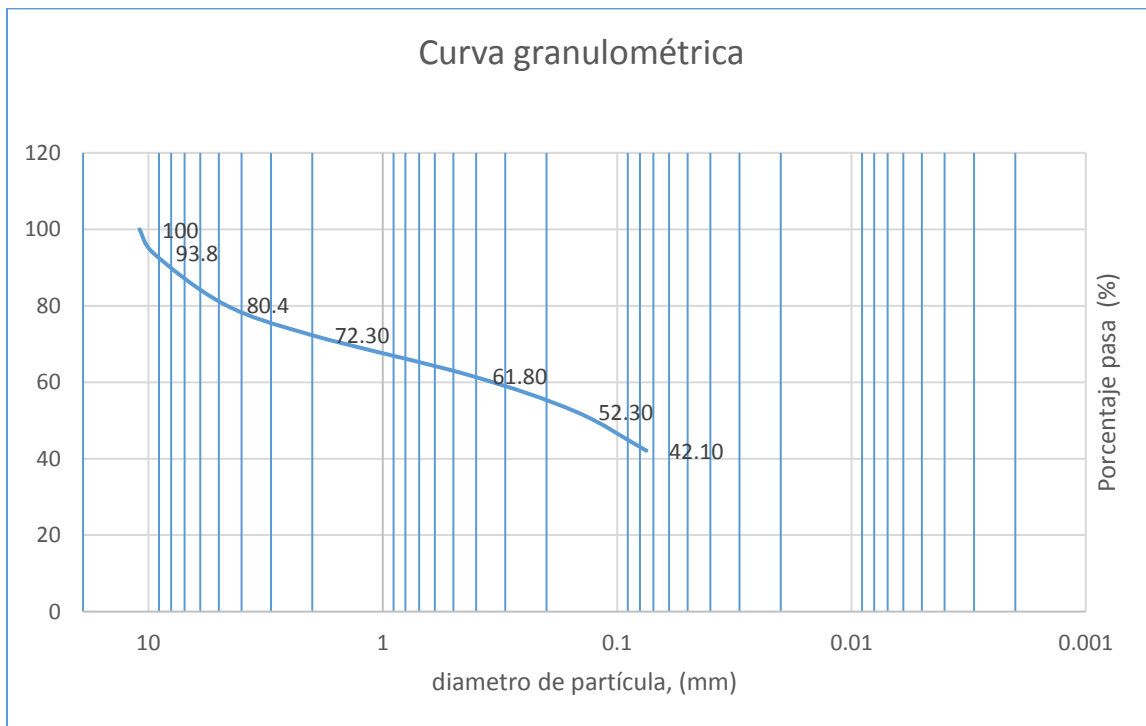
**Tabla 21. Resultados límites de Atterberg**

<b>LÍMITES DE ATTERBERG</b>	
Límite líquido	27.1%
Límite plástico	22.9%
Índice de plasticidad	4.2

**Tabla 22. Granulometría de la muestra de subrasante**

GRANULOMETRÍA	
TAMIZ	%PASA
3/4"	100
3/8"	93.8
No. 4	80.4
No. 10	72.3
No. 40	61.8
No. 100	52.3
No. 200	42.1

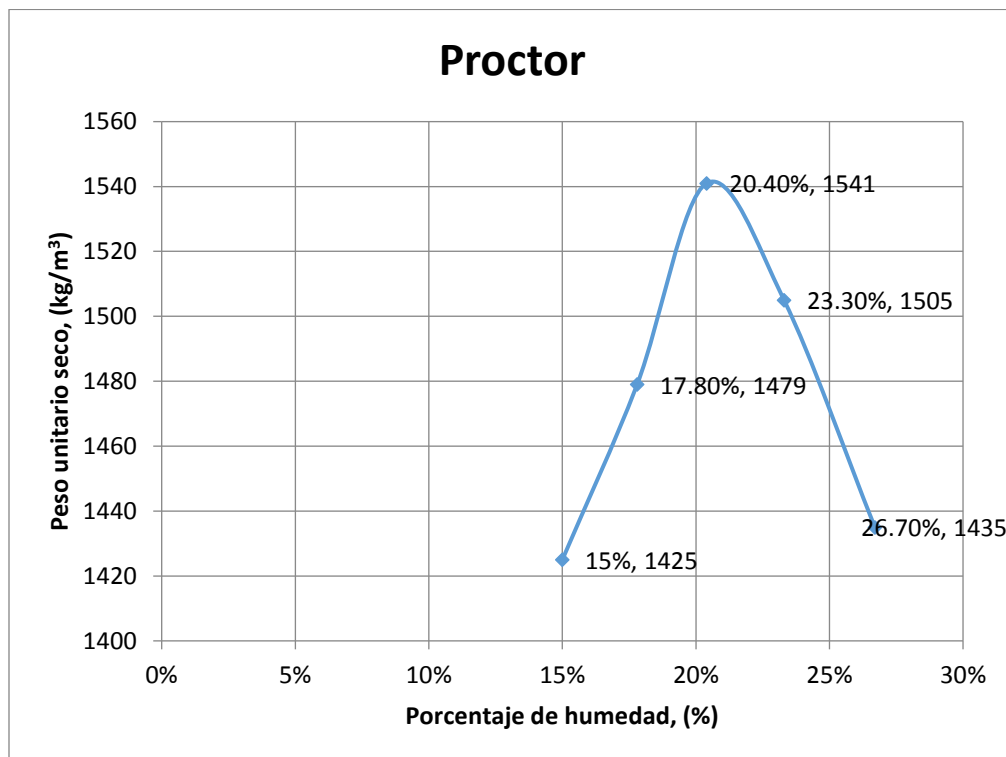
**Gráfica 2. Curva granulométrica de la muestra de subrasante**



**Tabla 23. Peso unitario seco y porcentaje de humedad de la muestra**

Peso unitario seco [kg/m <sup>3</sup> ]	Porcentaje de humedad
1425	15%
1479	17.8%
1541	20.4%
1505	23.3%
1435	26.7%

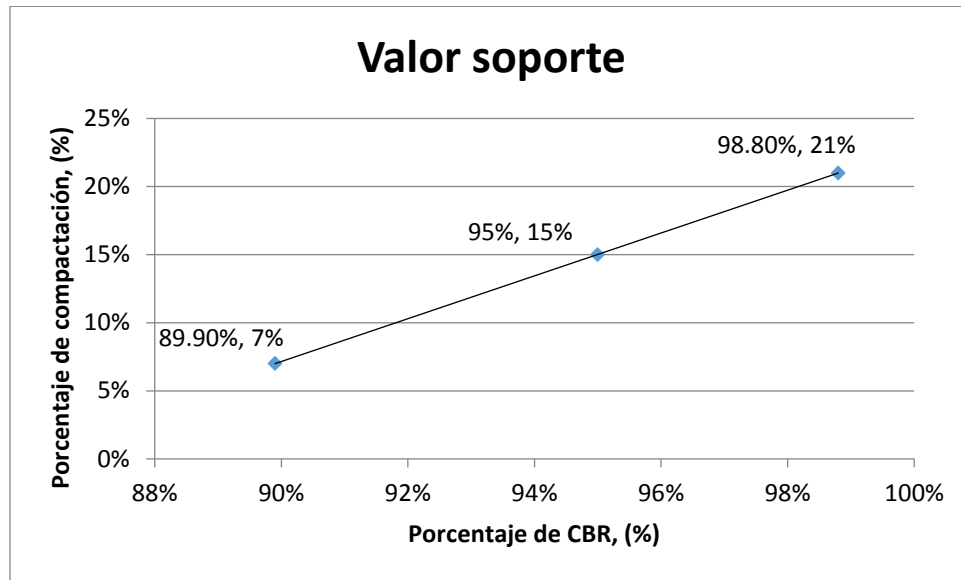
**Gráfica 3. Peso unitario seco vs porcentaje de humedad de la subrasante**



**Densidad máxima:** 1541 kg/m<sup>3</sup>

**Humedad óptima:** 20.4%

Gráfica 4. Ensayo de valor soporte CBR a la subrasante



**CBR al 95% de compactación: 15.0**

**Porcentaje de hinchamiento máximo: 0.6**

**1. Característica de la subrasante.** El suelo de subrasante se clasifica como una arcilla limo-arenosa café, el material arcilloso no es susceptible a cambios volumétricos ya que su índice de plasticidad es bajo ( $IP = 4.2$ ) para ser un suelo de subrasante, las arenas y los limos hacen que el suelo gane resistencia a corte, es por esto que se obtiene un CBR de 15%, no es recomendable diseñar con una subrasante mayor a 12% de valor soporte CBR, ya que se controla la ascendencia de humedad durante la vida útil. Las arenas y limos pueden dar altas resistencias al corte, para aumentar la confiabilidad se recomienda realizar ensayos triaxiales cíclicos a las muestras para evaluar su comportamiento ante la carga dinámica.

## B. Resultados para el tránsito de diseño

**Tabla 24. Tránsito diario en la zona**

TPD		
TIPO DE VEHÍCULO	TRANSITO DIARIO DE VEHÍCULO	PORCENTAJE
AUTOMÓVIL	11391	81.05%
PICK UP	1619	11.52%
C2	358	2.55%
C3	16	0.11%
C4	11	0.08%
T3-S2	9	0.06%
T3-S3	13	0.09%
MICROBÚS	451	3.21%
AUTOBÚS	187	1.33%

Se determinó que un promedio de 14,055 vehículos circulan diariamente en el área de la carretera analizada. El rango de tipos de vehículos es variado debido a que la zona es una vía principal a nivel centroamericano (CA-1). Se puede determinar que es un alto porcentaje de vehículos livianos que transitan diariamente en el área (automóviles y pickups), pero el número de vehículos pesados genera un mayor impacto en el cálculo del número de ejes equivalentes debido a que presentan mayores cargas en cada uno de sus ejes.

**Tabla 25. Tránsito de diseño y factores de tránsito FCa y Fd**

TRÁNSITO DE DISEÑO Y FACTORES DE TRÁNSITO	
Tránsito promedio diario (TPD)	14,055 vehículos
Factor del carril más cargado (FCa)	0.80
Factor de distribución por sentido (Fd)	0.50

El factor del carril más cargado (FCa) determina el porcentaje de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el carril de diseño, por lo tanto, el porcentaje de carga disminuye al aumentar el número de carriles. Esto sucede porque las cargas de tránsito se distribuyen en más carriles. Para el sector de la carretera analizado se determinó un FCa de 0.80, debido a que el área de la carretera analizada tiene dos carriles en cada sentido de la vía.

Se analizó que la vía de la carretera estudiada tiene un comportamiento de transporte de ida y vuelta. Tanto vehículos livianos, buses y camiones transitan equitativamente en ambos sentidos de

la vía, variando dependiendo del horario del día. Se definió un factor de distribución por sentido (Fd) del cincuenta por ciento (0.50) porque el comportamiento del sentido de cargas de la carretera es igual en la vía hacia carretera al Salvador como en la vía hacia la Ciudad de Guatemala.

**Tabla 26. Fe por tipo de vehículo**

TIPO DE VEHÍCULO	PESO EJES (TON)			CÁLCULO FACTOR DE EQUIVALENCIA				Fe
	SIMPLE-SIMPLE	SIMPLE-DOBLE	TÁNDEM DOBLE	TRIDEM DOBLE	SIMPLE-SIMPLE	SIMPLE-DOBLE	TÁNDEM DOBLE	
AUTOMOVIL								0.0004
PICKUP								0.0018
C2	5.5	10			0.4822253086	2.211793566	0	2.6940
C3	5.5		16.5		0.4822253086	0	1.4641	1.9464
C4	5			20	0.329385347	0	0	0.9011
T2-S1	5	2 ejes 9 TON			0.329385347	2.902315518	0	3.2317
T2-S2	5	9	16		0.329385347	1.451157759	1.294538272	3.0751
T3-S1	5	9	16		0.329385347	1.451157759	1.294538272	3.0751
T3-S2	5	2 ejes 16 TON			0.329385347	0	2.589076543	2.9185
T3-S3	5	9	16	20	0.329385347	0	1.294538272	2.1957
T2-S3	5	9		20	0.329385347	1.451157759	0	2.3523
MICROBUS	2 ejes 3 TON				0.10377589	0	0	0.1038
AUTOBUS	5	8			0.329385347	0.905950645	0	1.2353

Tabla 27. FeCG

FACTOR DE EQUIVALENCIA GLOBAL				
TIPO DE VEHICULO	TRÁNSITO DIARIO	PORCENTAJE DE TIPO DE VEHICULO TRANSITADO	FACTOR DE AGRESIÓN POR TIPO DE VEHÍCULO (Fe)	PORCENTAJE DE (Fe) POR TIPO DE VEHÍCULO
AUTOMÓVIL	11391	81.05%	0.000324184	0.34%
PICKUP	1619	11.52%	0.000207343	0.22%
C2	358	2.55%	0.068621039	71.67%
C3	16	0.11%	0.002215699	2.31%
C4	11	0.08%	0.000705267	0.74%
T2-S1	0	0.00%	0	0.00%
T2-S2	0	0.00%	0	0.00%
T3-S1	0	0.00%	0	0.00%
T3-S2	9	0.06%	0.001868812	1.95%
T3-S3	13	0.09%	0.002030864	2.12%
T2-S3	0	0.00%	0	0.00%
MICROBUS	451	3.21%	0.003329984	3.48%
AUTOBUS	187	1.33%	0.016435989	17.17%
<b>TPD</b>	<b>14055</b>	$\Sigma fe$	0.095739181	100%
<b>FeCG= <math>\Sigma Fe/Vc</math></b>			<b>1.28766908</b>	

La carga que presenta un vehículo en cada eje se distribuye dependiendo el tipo de eje que posee (simple, tándem o tridem), por lo tanto, en un caso que se presente la misma carga en un vehículo, con un eje simple se genera mayor impacto que cualquier eje tándem o tridem, debido a que las cargas del vehículo se concentran en un solo eje, ya sea simple-simple o simple-doble.

El factor de agresión de tránsito varía dependiendo el tipo de vehículo. Esto debido a que cambia la cantidad de ejes, la carga por ejes y el tipo de ejes por cada vehículo. Conforme las cargas de un vehículo sean mayores, el factor de agresión aumenta, pero el valor (Fe) varía dependiendo el tipo de eje que presente el vehículo.

En el caso analizado se determinó que un 92.57% de los vehículos que circulan diariamente en el área son vehículos livianos (automóviles y pickups), pero solo equivalen al 0.56% del factor de agresión de tránsito de diseño, expresando que los vehículos livianos no son representativos para el cálculo de ejes equivalentes en el diseño de tránsito. El pequeño porcentaje de tránsito de vehículos pesados como buses, camiones y remolques influye en el mayor porcentaje de agresión para el cálculo

de ejes equivalentes, debido a que mayores cargas, aunque sean menores en cantidad, provocan más desgaste en el pavimento.

**Tabla 28. Datos y factores de diseño para el cálculo del Ndiario**

<b>Ndiario</b>		
<b>Descripción del factor</b>	<b>Abreviación del factor</b>	<b>Resultado</b>
Tránsito promedio diario	TPD	14055
Factor de distribución de cargas por sentido	FCa	0.80
Factor del carril más cargado	Fd	0.50
Factor de equivalencia global	FeCG	1.28766908
Porcentaje de buses y camiones	Vc	7.435%

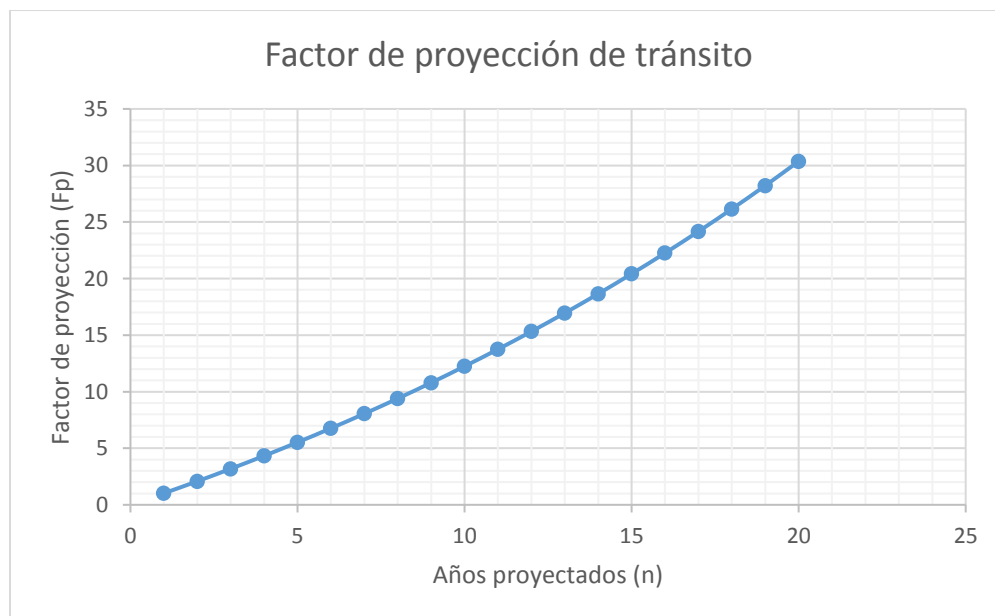
$$N_{DIARIO} = (TPD) * (Fd) * (FCa) * (Vc) * (FeCG)$$

**N diario = 538.25 ejes equivalentes diarios**

#### **Ecuación 21. Factor de proyección**

$$Fp = \frac{(1 - R)^n - 1}{\ln(1 + R)}$$

**Gráfica 5. Factor de proyección de tránsito**



Tasa de crecimiento (R) = 4.00 %

Proyección de años de servicio (n) = 20 años

**Factor de proyección (Fp) = 30.3697**

**Ecuación 22. Número de ejes equivalentes (ESAL)**

$$(ESAL)W_{18} = 365 * (TPD) * (Vc) * (FeCG) * (Fd) * (FCa) * (Fp)$$

**ESAL  $W_{18}$  = 5,966,431**

Se determinó que en el área analizada circulan 538 ejes equivalentes de 8.2 toneladas diariamente. Para determinar el valor de ejes equivalentes (ESAL) de diseño para pavimentos flexibles y rígidos, se realizó una proyección de 20 años de servicio, en los cuales se tomó en cuenta una tasa de crecimiento de tránsito (R) del 4% debido que el crecimiento poblacional aumentará el tránsito en la carretera en el paso de los años.

Realizando el diseño de tránsito, se determinó que para veinte años de servicio de la carretera circularán 5,966,430 ejes equivalentes de 8.2 toneladas.

### C. Resultados para el diseño de pavimento asfáltico:

**Tabla 29. Datos para el diseño del pavimento asfáltico**

<b>DATOS PARA DISEÑO</b>	
<b>Ejes equivalentes (ESAL)</b>	5,979,571
<b>Nivel de confiabilidad (R%)</b>	85%
<b>Desviación normal estándar (Zr)</b>	-1.037
<b>Error normal combinado (So)</b>	0.50
<b>Serviciabilidad inicial (Po)</b>	4.20
<b>Serviciabilidad final (Pt)</b>	2.0
<b>Diferencial de serviciabilidad (<math>\Delta</math>IPS)</b>	2.20
<b>Módulo de resiliencia (Mr)</b>	12,000 psi

$Mr$  (Psi) = CBR\*100\*14.2 < 12,000 psi

**Mr = 12,000 psi**

En el ensayo CBR de la subrasante resultó que el valor soporte para un 95% de compactación del suelo es 15. De ser así, el módulo de resiliencia de la subrasante sería de 21,300 psi, pero se tomó un factor de seguridad para módulo de resiliencia (Mr) máximo de subrasante de 12,000 psi porque en tramos largos de la carretera el suelo es variado y las propiedades de subrasante cambian en

cualquier área (lo ideal es trabajar con tramos homogéneos de subrasante). En este caso se analizó solo un sector de la carretera, por lo que es un representativo de subrasante pero no es ideal para el diseño de un tramo con varios kilómetros.

### 1. Cálculo del número estructural requerido (SN req)

#### Ecuación 23. Ecuación AASHTO 93 para pavimento flexible

$$\log(N) = Z_r \times S_r + 9.36 \times \log(SN + 1) - 0.20 + \left( \frac{\log\left(\frac{\Delta IPS}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1904}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} \right) + 2.32 \times \log(Mr) - 8.07$$

$$\mathbf{SN \text{ req} = 3.611}$$

Se determinó, despejando mediante un programa de cálculo, que para la cantidad de ejes equivalentes de 8.2 toneladas de diseño proyectadas a 20 años de servicio se requiere un número estructural de pavimento de 3.611.

**Tabla 30. Módulo de elasticidad de las capas estructurales del pavimento asfáltico**

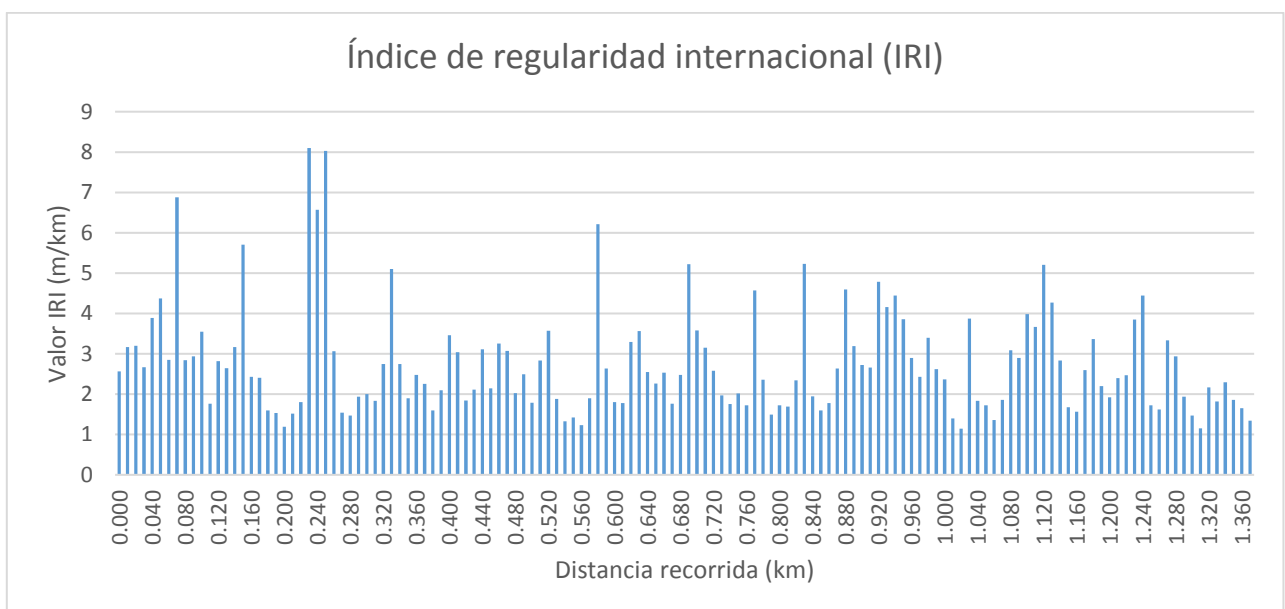
Capa estructural del pavimento	Módulo de elasticidad (E) [MPa]	Módulo de elasticidad (E) [Kg/cm <sup>2</sup> ]
Carpetas <sub>1</sub>	2,450	24,980
Base <sub>2</sub>	200	2,039
Subbase <sub>3</sub>	100	1,020

**2. Medición de deformaciones para determinar el estado de serviciabilidad actual del pavimento.** Se determinó el índice de regularidad internacional (IRI) a cada 10 metros por una distancia total de 1.37 kilómetros. En la tabla se expresa la medida a cada 100 metros, por lo que no es representativo para los resultados finales, debido a que el promedio se determinó en la medición por cada 10 metros. El perfilómetro contiene dos láseres de medición, uno del lado izquierdo y otro en el lado derecho, el IRI utilizado es el promedio entre el IRI del lado izquierdo y el IRI del lado derecho.

Tabla 30. Medición del IRI promedio

Distancia recorrida (m)	IRI izquierdo	IRI derecho	IRI Promedio
0	2.13	3	2.565
100	2.73	4.37	3.55
200	1.05	1.33	1.19
300	1.98	2.02	2
400	1.76	5.16	3.46
500	1.95	1.62	1.785
600	1.85	1.75	1.8
700	2.71	4.44	3.575
800	1.63	1.82	1.725
900	4.08	1.36	2.72
1000	2.18	2.55	2.365
1100	4.16	3.81	3.985
1200	2.4	1.45	1.925
1300	1.05	1.89	1.47
1370	1.32	1.37	1.345

Gráfica 6. ÍRI



$$\text{IRI PROMEDIO} = 2.7587 \text{ m/km}$$

a. Índice de serviciabilidad actual del pavimento ( $P_a$ )

**Ecuación 24. Serviciabilidad actual del pavimento**

$$P_a = 7.1 - (2.19 * IRI^{0.5})$$

\*IRI [m/km]

$$P_a = 3.4626$$

En la tabla anterior se presenta el IRI promedio a cada 100 metros recorridos, en la gráfica se puede observar el IRI promedio cada 10 metros recorridos. Para calcular el índice de serviciabilidad actual del pavimento ( $P_a$ ) se utilizó el IRI promedio real determinado en la medición a cada 10 metros recorridos como se indica en la gráfica anterior. De esta manera se obtuvo un resultado más confiable para el valor de IRI y para el cálculo del índice de serviciabilidad actual.

- b. **Serviciabilidad y porcentaje de vida restante del pavimento.** Se determinó el porcentaje de vida restante del pavimento mediante un método de interpolación:

**Ecuación 25. Interpolación para determinar porcentaje de vida del pavimento**

$$PVA\% = PVF\% + \frac{P_a - P_t}{P_t - P_o} (PVI\% - PVF\%)$$

Tomando en cuenta que el porcentaje de vida final e inicial equivale al 0% y 100% respectivamente, se interpoló utilizando el valor de serviciabilidad actual ( $P_a$ ) obtenido mediante el cálculo con el IRI promedio.

**Tabla 31. Serviciabilidad actual del pavimento**

	Índice de serviciabilidad	Porcentaje de vida restante del pavimento
<b>Serviciabilidad final</b>	$P_t = 2.00$	$PVF\% = 0\%$
<b>Serviciabilidad actual</b>	$P_a = 3.4626$	$PVA\% = 66.36\%$
<b>Serviciabilidad Inicial</b>	$P_o = 4.20$	$PVI\% = 100\%$

En los resultados obtenidos, se determinó que el pavimento en el sector analizado no necesita de un mantenimiento en esta etapa de su vida útil porque el porcentaje de vida restante del pavimento es de un 66.36%, indicando que el pavimento no se encuentra en un estado crítico de reparación. Por fines analíticos y tema de investigación, se planteó la idea de realizar un mantenimiento al pavimento actual. Este mantenimiento consiste en la construcción de una sobre capa asfáltica o sobre capa rígida (Whitetopping).

Para simular las propiedades del pavimento actual se determinó el factor de condición (CF) mediante la gráfica representativa. El valor del factor de condición depende directamente de la vida restante del pavimento. Debido a que el pavimento actual tiene una vida restante del 66.36%, el valor del factor de condición es del 92%.

$$CF = 0.92$$

El valor de condición tiende a cero exponencialmente en el período de vida restante del pavimento, por lo que al pasar de los años las capas estructurales se ven afectadas y el costo del mantenimiento del pavimento aumenta y al cumplir la etapa final de vida de pavimento los costos para reparar el pavimento son aún mayores. Si se espera a realizar los mantenimientos en la última parte del período de vida restante del pavimento, el factor de condición es menor por lo que los aportes estructurales de las capas del pavimento actuales son menores.

### c. Coeficiente de aporte estructural

**Tabla 32. Coeficiente de aporte estructural**

<b>Coeficiente de aporte estructural</b>			
<b>Capa estructural del pavimento</b>	<b>Ecuación del coeficiente de aporte estructural</b>	<b>Coeficiente de aporte estructural (<math>A_n</math>) (Sin Factor)</b>	<b>Coeficiente de aporte estructural (<math>A_n</math>) (Con factor) CF =0.92</b>
Carpetas <sub>1</sub>	$A_1 = 0.0029(E_1)^{0.486}$	0.3978	0.3659
Base <sub>2</sub>	$A_2 = 0.249 \log(E_2)^{-0.689}$	0.1351	0.0691
Subbase <sub>3</sub>	$A_2 = 0.227 \log(E_3)^{-0.577}$	0.1059	0.0513
Módulo elasticidad ( $E_n$ ): [kg/cm <sup>2</sup> ]			

Debido a que el pavimento actual ya cuenta con un porcentaje de su vida útil en servicio, se utilizó el factor de condición (CF = 0.92) para simular el diseño con las condiciones actuales del pavimento. Por lo que se determinó el coeficiente de aporte estructural ( $A_n$ ) actual mediante el producto del aporte estructural de diseño y el factor de condición por servicio.

### 3. Cálculo del número estructural (SN est-actual):

Tabla 33. Cálculo del número estructural actual (SN est-actual)

Capa estructural del pavimento	Coefficiente de aporte estructural con factor (actual) (a)	Coefficiente de drenaje actual (Cd)	Espesor de la capa actual (H) [in]	Número estructural actual ( $a_n * C_{d_n} * H_n$ )
Carpeta <sub>1</sub>	0.3659	0.90	3.937 (10 cm)	<b>1.2967</b>
Base <sub>2</sub>	0.0691	0.80	4.905 (15 cm)	<b>0.2858</b>
Subbase <sub>3</sub>	0.0513	0.60	7.874 (20 cm)	<b>0.2423</b>
<b>SN est-actual</b>				<b>1.825</b>

### 4. Cálculo del número estructural sobre capa (SN est-sc)

Tabla 34. Cálculo del número estructural sobre capa (SN est-sc)

Número estructural de sobre capa (SN est-sc)		
Capa estructural: Carpeta	Sobrecapa asfáltica convencional	Sobrecapa asfáltica modificada con nanofibras de carbono
Módulo de elasticidad $E_1$ ,	2,450 MPa – 24,980 kg/cm <sup>2</sup>	3,750 MPa – 38,235 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente de aporte estructural ( $a_1$ )	0.3978	0.4892
<b>Espesor de la carpeta <math>H_1</math></b>	<b>12 cm – 4.724 in</b>	<b>10 cm – 3.937 in</b>
<b>SN est-sc = <math>a_1 * H_1 * C_1</math></b>	<b>1.879</b>	<b>1.926</b>

Tabla 35. Cálculo del número estructural del pavimento (SN est)

Número estructural pavimento asfáltico		
Número estructural (SN)	Mezcla de diseño convencional	Mezcla de diseño modificada con nanofibras de carbono
SN est-actual	1.825	1.825
SN est-sc	1.879	1.926
<b>SN est</b>	<b>3.704 &gt; SN req</b>	<b>3.751 &gt; SN req</b>
<b>SN req</b>	<b>3.611</b>	<b>3.611</b>

Inicialmente, se determinó que para el diseño del pavimento con el tránsito de diseño proyectado a 20 años de servicio se requiere un número estructural (SN req) de 3.611. Definiendo las

condiciones actuales del pavimento, el aporte estructural de todas las capas del pavimento actual (Carpeta, base y subbase) es de 1.825, por lo tanto, si el usuario desea un diseño proyectado a 20 años, es necesario el mantenimiento y construcción de una nueva superficie de carpeta asfáltica que aporte el valor estructural suficiente como lo requiere el número estructural de diseño (SN req).

Para el diseño de la carpeta asfáltica se tomaron en cuenta dos diseños, un primer diseño con una mezcla asfáltica convencional y otro diseño modificado con nanofibras de carbono. Se consideró realizar el diseño con una mezcla asfáltica modificada con nanofibras de carbono porque investigaciones previas revelan que el módulo de elasticidad de la mezcla aumenta en promedio de 2,450 MPa a 3,750 MPa (20°C) con la utilización de las nanofibras. (Rubio y Martínez, 2014)

Con diferentes módulos de elasticidad en cada una de las mezclas diseñadas, se determinó que el aporte estructural de la carpeta asfáltica modificada aumenta considerablemente porque el módulo de elasticidad incrementa. Calculando la diferencia entre el número estructural requerido (SN req) y el número estructural actual del pavimento (SN est-actual), el número estructural de la sobre capa (SN est-sc) debe ser mayor a 1.79 para cumplir con el diseño de tránsito proyectado.

Cumpliendo con el requerimiento de diseño, se determinó que el espesor de la carpeta asfáltica convencional necesario para el servicio de tránsito de diseño proyectado es de 12 centímetros, dando como resultado un número estructural de sobre capa (SN est-sc) de 1.879 y número estructural (SN est) de 3.704, mayor al número estructural requerido (SN req). Para el diseño de la sobre capa asfáltica con mezcla modificada, el resultado del número estructural de sobre capa (SN est-sc) es de 1.926 y el número estructural (SN est) es de 3.751 cumpliendo con el valor del número estructural requerido (SNreq) con un espesor de sobre capa asfáltica modificada de 10 centímetros.

#### D. Resultados para el diseño de pavimento rígido

**Tabla 36. Datos para el diseño de sobre capa de pavimento rígido**

<b>DATOS PARA DISEÑO</b>	
<b>Ejes equivalentes (ESAL <math>W_{18}</math>)</b>	5,979,571
<b>Nivel de confiabilidad (R%)</b>	85%
<b>Desviación normal estándar (<math>Z_r</math>)</b>	-1.037
<b>Error normal combinado (<math>S_o</math>)</b>	0.50
<b>Serviciabilidad inicial (<math>P_o</math>)</b>	4.50
<b>Serviciabilidad final (<math>P_t</math>)</b>	2.0
<b>Diferencial de serviciabilidad (<math>\Delta IPS</math>)</b>	2.50
<b>Módulo de reacción de la subrasante (K)</b>	1000 lb/pulg <sup>3</sup>

**Tabla 37. Espesor de losa de sobre-capa para el pavimento rígido (Whitetopping)**

	<b>Mezcla de concreto MR600 convencional</b>	<b>Mezcla de concreto MR600 modificada con CNF</b>
<b>Módulo de ruptura (Sc)</b>	600 psi	762 psi
<b>Módulo de elasticidad (Ec)</b> $E_c = \frac{(Sc-488.5)*10^6}{43.5}$	2,563,218 psi	6,287,356 psi
<b>Espesor de losa (D)</b>	<b>10.048 in (25.52 cm)</b>	<b>8.825 in (22.42 cm)</b>

Para el diseño del pavimento rígido se diseñó con una mezcla de concreto para pavimentos MR600 y una mezcla de concreto MR600 modificada con nanofibras de carbono.

El módulo de ruptura de la mezcla de concreto MR600 es de 600 psi [41kg/cm<sup>2</sup>] y para la mezcla de concreto MR600 modificada con nanofibras de carbono se definió el módulo de ruptura en base a los resultados de un artículo de investigación que expresan que el módulo de ruptura de una mezcla de concreto modificada con nanofibras de carbono puede aumentar en un 27% utilizando una masa de nanofibras al 2% del peso de cemento utilizado en la mezcla. (Li, Wang y Zhao, 2005)

Para el cálculo del módulo de reacción K combinado de subbase y subrasante se utilizó un deflectómetro de impacto, se midieron las deflexiones en 7 deformímetros con una carga de 40 KN, luego se utilizó un software de retrocálculo diseñado por la empresa SERPIN para determinar el módulo combinado de pavimento y con esto ingresar a la Ilustración No.5 de (AASHTO, 1993) y determinar el módulo de reacción K.

Realizando el diseño de pavimentos con las propiedades mecánicas de cada una de las mezclas utilizadas se determinó, que con el tránsito de diseño proyectado, para una mezcla de concreto MR600 convencional el espesor de la losa para un whitetopping es de 10 pulgadas (25.50cm) y para una mezcla de concreto MR600 modificada con nanofibras de carbono es de 8.825 pulgadas (22.50cm).

**E. Análisis de costos para sobre capa asfáltica y Whitetopping de concreto:**  
**Sobre capa asfáltica:**

**Tabla 38. Volumen de concreto asfáltico en cada tipo de mezcla**

<b>Cálculo de volumen de concreto asfáltico en cada tipo de mezcla</b>		
	<b>Sobre capa asfáltica convencional</b>	<b>Sobre capa asfáltica modificada con CNF</b>
<b>Tramo homogéneo</b>	1,000 m	1,000 m
<b>Ancho pavimento: (4 carriles de 3.50m)</b>	14.0 m	14.0 m
<b>Espesor de la carpeta (H)</b>	12.00 cm	10.00 cm
<b>Volumen de concreto asfáltico</b>	1680.00 m <sup>3</sup> / km	1400.00 m <sup>3</sup> / km

**Tabla 39. Ahorro económico en volumen de concreto asfáltico**

<b>Ahorro económico en masa de mezcla asfáltica para concreto asfáltico por kilómetro</b>	
<b>Diferencia de volumen de concreto asfáltico (V)</b>	280.00 m <sup>3</sup>
<b>Densidad de la mezcla asfáltica (ρ)</b>	2.40 Ton/m <sup>3</sup>
<b>Masa de mezcla asfáltica ( m = ρ * V )</b>	672.00 Ton
<b>Precio por tonelada mezcla asfáltica</b>	Q 600.00
<b>Ahorro en masa de mezcla asfáltica por kilómetro</b>	<b>Q 403,200.00</b>

**Tabla 40. Masa de bitumen en la mezcla de concreto asfáltico**

<b>Cálculo de masa de bitumen para 1 metro cúbico de mezcla de concreto asfáltico</b>	
<b>Volumen de concreto asfáltico (V)</b>	1.00 m <sup>3</sup>
<b>Densidad de la mezcla (ρ)</b>	2.40 ton / m <sup>3</sup>
<b>Masa de la mezcla asfáltica ( m = ρV)</b>	2.40 ton o 2400 kg
<b>Masa de bitumen en mezcla asfáltica (óptimo 5.10% de mezcla asfáltica)</b>	122.40 kg / m <sup>3</sup>

**Tabla 41. Masa de CNF necesarias en mezcla de concreto asfáltico**

<b>Masa de nanofibras de carbono para un tramo homogéneo de 1 kilómetro</b>		
<b>Masa de CNF por m<sup>3</sup> de concreto asfáltico [2% masa de bitumen]</b>	<b>Volumen de concreto asfáltico para mezcla modificada con CNF</b>	<b>Masa de CNF por kilómetro de pavimento modificado</b>
2.448 Kg / m <sup>3</sup>	1400 m <sup>3</sup> / km	3,427 kg / km

Analizando la diferencia de volumen que presenta cada una de las mezclas asfálticas (convencional y modificada), se puede determinar que por una pequeña diferencia de 2 centímetros de espesor en la sobre capa se puede generar una diferencia de volumen de 280 metros cúbicos por un tramo de un kilómetro con cuatro carriles (2 carriles por vía).

De la misma manera, se considera que para generar un ahorro en el espesor de la carpeta asfáltica de diseño, es necesario utilizar el 2% de la masa del bitumen en nanofibras de carbono. Esta masa de nanofibras de carbono necesaria está definida en función al volumen total de concreto asfáltico utilizado en la mezcla modificada, por lo tanto, en el tramo de un kilómetro analizado es necesario utilizar 1400 m<sup>3</sup> de concreto asfáltico modificado.

Una mezcla asfáltica convencional lleva aproximadamente de 4-6 % de bitumen, en este caso se tomó un porcentaje de 5.1 %, por lo tanto, para generar el ahorro neto de 280 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica es necesario la producción de 3427 kilogramos en nanofibras de carbono.

Cuando se necesita una cantidad tan alta de nanofibras de carbono para generar ese ahorro en volumen de concreto asfáltico, no se puede comparar el precio en volumen de asfalto ahorrado contra el valor de las nanofibras de carbono debido a que el precio es muy alto. En la actualidad los métodos de producción de nanofibras son económicamente altos por lo que no tiene beneficios en el costo económico el diseño con mezclas modificadas a menos que se obtenga como subproducto o se analicen beneficios a largo plazo.

### Sobre capa de concreto rígido (Whitetopping)

**Tabla 42. Volumen de concreto hidráulico en cada tipo de mezcla**

<b>Cálculo del volumen de concreto hidráulico en cada tipo de mezcla</b>		
	<b>Mezcla de concreto MR600 convencional</b>	<b>Mezcla de concreto MR600 modificada con CNF</b>
<b>Tramo homogéneo</b>	1,000 m	1,000 m
<b>Ancho pavimento: (4 carriles de 3.50m)</b>	14.0 m	14.0 m
<b>Espesor de la losa (D)</b>	25.50 cm (>10 in)	22.50 cm (>8.825 in)
<b>Volumen de concreto</b>	3,570.00 m <sup>3</sup> / km	3,150.00 m <sup>3</sup> / km

**Tabla 43. Ahorro económico en volumen de concreto hidráulico**

<b>Ahorro económico en volumen de concreto hidráulico</b>	
<b>Diferencia de volumen de concreto entre la mezcla MR600 convencional y MR600 modificada con CNF</b>	420.00 m <sup>3</sup>
<b>Precio actual concreto MR600</b>	1,283.00 Q/m <sup>3</sup>
<b>Ahorro en volumen de concreto por kilómetro</b>	<b>Q 538,691.00</b>

**Tabla 44. Masa de CNF necesarias en mezcla de concreto hidráulico**

<b>Masa de CNF por metro cúbico de mezcla de concreto hidráulico MR600 modificada</b>			
<b>Masa de cemento CFB por m<sup>3</sup> de mezcla MR600</b>	<b>Masa de CNF por m<sup>3</sup> de concreto hidráulico [2% masa de cemento]</b>	<b>Volumen de concreto hidráulico MR600 para mezcla modificada con CNF</b>	<b>Masa de CNF por kilómetro de pavimento modificado</b>
320 Kg / m <sup>3</sup>	6.40 kg / m <sup>3</sup>	3,150 m <sup>3</sup> / km	20,160 kg / km

En el análisis de espesores de losa para concreto hidráulico MR600 convencional y modificado se determinó una diferencia de espesor de 3 centímetros, 25.50 cm para una mezcla modificada y 22.50 cm para una mezcla convencional. Generando una diferencia de volumen de 420 m<sup>3</sup> en un tramo homogéneo de un kilómetro con cuatro carriles. El ahorro económico generado por la diferencia del costo del volumen de concreto es alto, aunque se debe considerar que el volumen de concreto modificado necesario por kilómetro es elevado.

Una mezcla de concreto MR600 convencional necesita aproximadamente 320 kilogramos de cemento estructural CFB por metro cúbico. Para obtener las propiedades físicas expresadas en el módulo de ruptura y elasticidad del concreto modificado, es necesario la utilización del 2% del peso del cemento CFB en masa de las nanofibras de carbono. El volumen de concreto hidráulico MR 600 modificado con nanofibras de carbono para un tramo homogéneo de un kilómetro y cuatro carriles es de 3,150 m<sup>3</sup>, por lo que se necesita 20,160 kilogramos de nanofibras de carbono para obtener las propiedades mecánicas del concreto necesarias de la mezcla modificada.

Debido a que el espesor de la losa de concreto es mayor al del asfalto, el volumen de concreto hidráulico modificado con nanofibras de carbono es mucho mayor. También se puede ver que la mezcla asfáltica utiliza 2.448 kilogramos de nanofibras por metro cúbico de concreto asfáltico y el

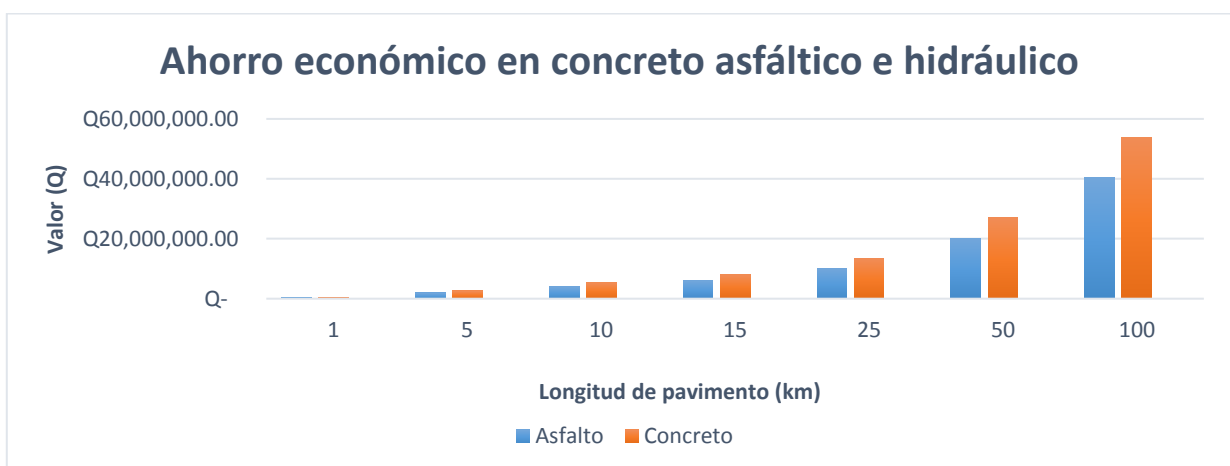
concreto hidráulico utiliza 6.40 kilogramos de nanofibras de carbono por metro cúbico, lo que genera que en la mezcla de concreto hidráulico se utilice casi 6 veces la masa de nanofibras de carbono por kilómetro que en la mezcla de concreto asfáltico, este índice se ve relacionado también por el porcentaje de cemento y bitumen que utiliza cada tipo de mezcla.

Tanto en concreto asfáltico como en concreto hidráulico se puede observar que la utilización de nanofibras genera un ahorro en el costo por volumen de concreto, aunque se determinó que es mucho mayor el impacto que genera el costo por la utilización de nanofibras de carbono para la mezcla, debido a que la masa de nanofibras de carbono necesaria es muy elevada al igual que su costo.

Desde otro punto de vista, investigaciones presentan un nuevo método de producción de nanofibras de carbono. Es un método que provee ventajas para el medio ambiente convirtiendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en nanofibras de carbono mediante reactores. Aunque el método no es el más eficiente produciendo pocas nanofibras por hora, es un método prometedor para la producción económica de nanofibras de carbono. (Webb, 2015)

Tomando en cuenta que se podría emplear la producción de CNF mediante el método de reactores de CO<sub>2</sub>, se puede realizar mezclas de concreto asfáltico o hidráulico modificadas con un pequeño porcentaje de masa de CNF de carbono manteniendo las propiedades de los materiales de diseño convencionales. Empleando una mezcla modificada con un bajo porcentaje en masa de CNF se pueden mejorar las condiciones de servicio del pavimento, generando mayor calidad de vida útil del pavimento y resistencia a efectos de ahuellamiento y fatiga.

**Gráfica 7. Ahorro en volumen de concreto asfáltico e hidráulico en proyectos de pavimentación con diferentes longitudes**



## VI. CONCLUSIONES

- La nanotecnología aplicada puede optimizar y aumentar la durabilidad de las estructuras mejorando propiedades mecánicas de los materiales de construcción. En mezclas de concreto asfáltico se puede mejorar el módulo de elasticidad y en mezclas de concreto hidráulico se puede mejorar el módulo de ruptura.
- Los CNTF son influyentes en las matrices del concreto y el asfalto, aumentando sus propiedades de resiliencia y contrarrestando la fatiga ante las cargas dinámicas. Su interacción en la matriz va a depender de su morfología (longitudes y diámetros). La sección longitudinal de los nanotubos y nanofibras de carbono ayuda a crear enlaces con otros mejorando el módulo de elasticidad en concreto asfáltico y el módulo de ruptura en concreto hidráulico.
- Los suelos de subrasante característicos de este sector de la ciudad de Guatemala permiten trabajar modificaciones a nivel de capas estructurales, ya que se cuentan con suelos de buena calidad. Probablemente, en caso contrario, se trabajaría nanotecnología para estabilizar subrasantes.
- Durante el proceso de diseño con la metodología AASHTO 1993 para pavimentos flexibles, el factor de variación entre el diseño de un pavimento convencional y otro modificado con CNTF es el módulo de elasticidad, éste factor de diseño afecta el coeficiente de aporte estructural el cual incrementa proporcionalmente al aumento del módulo de elasticidad. En el caso de pavimentos rígidos las mezclas modificadas con CNTF benefician con un aumento en el módulo de ruptura, el cual genera mayor resistencia a flexión.
- Los métodos de laboratorio para síntesis de nanofibras y nanotubos de carbono son muy costosos, sin embargo proveen una ventaja, el subproducto de este proceso es el hidrógeno, fuente de energía. El mayor beneficio de los nanomateriales aplicados en la ingeniería civil se produce en cuanto éstos se obtengan como un subproducto de la industria, existe mucho interés en el primer mundo de contrarrestar emisiones de CO<sub>2</sub>.

- Al ejecutar proyectos de infraestructura vial de gran longitud se pueden generar mayores beneficios en costos por volumen de mezcla asfáltica o de concreto hidráulico. Considerando obtener los nanomateriales sin costo por ser un subproducto de la industria. En el caso que no se obtengan todas las CNTF necesarias para la mezcla, se puede considerar las propiedades mecánicas mejoradas obtenidas con una mezcla modificada con un bajo porcentaje de nanofibras, de forma que se diseñe un mismo espesor con respecto al convencional pero aumentando sus propiedades de durabilidad del pavimento ante la fatiga y el ahuellamiento.
- La vida útil de un pavimento se puede mejorar debido a que la aplicación de CNTF en las mezclas de concreto hidráulico y concreto asfáltico mejora las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas aumentando los módulos de elasticidad y ruptura, de esta forma se puede tener un mejor comportamiento ante las cargas dinámicas que generan fatiga y ahuellamiento, evitando las fallas de las capas estructurales.

## VII. RECOMENDACIONES

Mediante los ensayos de suelos realizados a la muestra de subrasante se logra obtener información de las propiedades mecánicas del suelo, pero también es importante investigar la resistencia de subrasante con ensayos triaxiales que permitan obtener características más confiables en términos de elasticidad del material.

Existe un gran impacto en los temas de obtención de nanofibras de carbono por medio de reactores de CO<sub>2</sub> al igual que en la producción de hidrógeno por CCVD. Estos temas deben investigarse a fondo para que cada vez se vuelva más atractivo el uso de nano fibras de carbono en cualquiera de los campos de la ingeniería civil.

Así mismo, considero que es importante la aplicación de alotropías de carbono en mezclas de materiales estructurales, debido que se pueden mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de cualquier estructura a largo plazo, produciendo materiales de mejor calidad en términos de durabilidad y resistencia.

Para realizar el diseño de pavimentos flexibles o rígidos utilizando la metodología AASHTO 1993, es importante realizar un conteo de tránsito confiable para determinar el número de ejes equivalentes de diseño (ESAL), debido a que es un factor de gran influencia en el cálculo del espesor de las capas estructurales del pavimento.

Los fundamentos de esta investigación para la modificación con CNTF de la mezcla de concreto hidráulico para los pavimentos rígidos se basó en un estudio teórico presentado en el 2005 por Li, Whang y Zaho. Sería importante realizar ensayos prácticos en el laboratorio para determinar el módulo de elasticidad y módulo de ruptura entre una mezcla de concreto hidráulico convencional y una mezcla con los CNTF, de forma que se logre establecer una variación práctica entre los módulos de las mezclas convencionales y modificadas.

## VIII. FUENTES

- American Association of State Highway and Transportatios Officials. 1993. “*AASHTO Guide for design of pavement structures*”. Washington D.C.. P II-9-62
- Bañón, L. (2005) “T.37 – Anchura del carril en función del tipo de vía” En: [http://sirio.ua.es/proyectos/manual\\_%20carreteras/01030405.pdf](http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/01030405.pdf) [Acceso 16 septiembre 2016]
- Blas, Monzón, et al 2004. “*Materiales nanocarbonosos: nanotubos y nanofibras de carbono, aspectos básicos y métodos de producción*”. *Ingeniería química*, 417 pags.
- Carmona, S; Pedraza, C. (2009) “*Revisión del ensayo de tracción por hendimiento*” Chile. En: [http://www.concretonline.com/pdf/SERVICIOS/05\\_laboratorio/art\\_tec/CarmPed\\_SergCarm.pdf](http://www.concretonline.com/pdf/SERVICIOS/05_laboratorio/art_tec/CarmPed_SergCarm.pdf) [Acceso 11 septiembre 2016]
- Coronado, J. 2002 “Manual Centroamericano para diseño de pavimentos” (MCPDP). SIECA. Guatemala. 289 págs.
- Cossi, P. 2001 “Diseño de Pavimentos método AASHTO-93” Universidad Privada de Tacna.
- Del Río,S. 2001 “*Estructura y propiedades de las nanofibras de carbono. Aplicación como soporte de electrocatalizadores*”. Universidad de Zaragoza. 363 págs
- EIC. 2001. “*Análisis granulométrico*”. Escuela de ingeniería en Construcción En: [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/granulometria.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf) [Acceso 10 mayo 2016]
- EIC. 2001. “*Determinación de la capacidad de soporte del CBR del suelo*”. Escuela de ingeniería en Construcción En: [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/cbr.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cbr.pdf) [Acceso 11 mayo 2016]
- EIC. 2001. “*Determinación de los límites de Atterberg*”. Escuela de ingeniería en Construcción. En: [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/limites.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/limites.pdf) [Acceso 10 mayo 2016]
- Empresa Esinger. (2007) “*Módulo Elástico*”. En: <http://www.ensinger.es/es/informacion-tecnica/propiedades-tecnicas-de-los-plasticos/propiedades-mecanicas/modulo-elastico> [Acceso 11 de septiembre 2016]
- Galao, O. 2012. “*Matrices cementicias multifuncionales mediante adición de nanofibras de carbono*”. *Departamento de ingeniería de la construcción, obras públicas e infraestructura urbana*.
- Giro, S; Maldonado, A. 1985. “Análisis granulométrico por métodos automáticos”. CSIC, Cap 1 Pags 95-102.
- Gonzales, A. 1993. “Módulo de reacción de subrasante en cimentaciones superficiales” Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá. 8 págs
- Guevara, J. 2003. “*Evaluación técnica económica de pavimentos de concreto asfáltico e hidráulico en la Carretera Santa Rita – Iztapa*”. Universidad Nacional de Ingeniería. Nicaragua. 124 pa

Guevara, M 2010. “*Diseño de Mezclas asfálticas densas en frío basado en el método Marshall modificado de la universidad de Illinois*”. Universidad de el Salvador. 226 pags.

Higuera, C. 2011. “Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras”. Colombia. Volumen I-II.

INVIAS. 1998 “Manual de diseño de pavimentos asfálticos en vías con medio y altos volúmenes de tránsito”. Instituto Nacional de Vías, Bogotá D.C, 1998. P17)

Juanico, J. 2004. “Síntesis y caracterización de nanofibras de carbono para su aplicación en la adsorción de gases tóxicos” Universidad Autónoma metropolitana. Ciudad de México.

Lobo, S. 2007. “*Soporte en la elaboración de estudios, diseño e interventorías viales y mantenimiento del sistema de gestión de calidad de ESAO LTDA*” En: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/1829/2/122838.pdf> [Acceso 9 septiembre 2016]

Li, Y; Wang, M y Zaho, P. 2005. “Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multiwalled carbon nanotubes. Carbon 43, pags 1239-1245.

Maubert, Soto, et al 2000. “*Nanotubos de Carbono – La Era de la Nanotecnología*”. Universidad Autónoma Metropolitana. En: <http://www.razonypalabra.org.mx/N/n68/maubert.pdf> [Acceso 12 de mayo 2016]

Mnyusiwalla, A., Daar, A. S., & Singer, P. A. 2003. “*Mind the gap’: science and ethics in nanotechnology*” 14(3), R9.

Monsalve, L; Giraldo, L; Maya, J. (2012) “*Diseño de pavimento flexible y rígido*”. Armenia. Págs. 14-44.

Normativa de la infraestructura y transportes - Secretaría de comunicaciones y transportes. 2004. “*CMT. Características de los materiales – 02 Materiales para Concreto hidráulico*”. Ciudad de México. En: <http://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-2-02-005-04.pdf> [Acceso 12 de mayo 2016]

Poole Jr, C. P., & Owens, F. J. 2003. “*Introduction to nanotechnology. John Wiley & Sons*”. Barcelona, España. 399 págs

Roca, A y Visbal, I. 2013 “*Ahuellamiento en pavimentos asfálticos*” En: <https://es.scribd.com/doc/188408153/AHUELLAMIENTO-EN-PAVIMENTOS-ASFALTICOS> [Acceso 16 de septiembre 2016]

Rubio, R; Martinez, D. 2014. “Nanotubos de carbono para el mejoramiento de mezcla asfáltica MDC-2 y del asfalto colombiano 60/70” Pontificia Universidad Javeriana. 165 pags

Sanchez, F. 2012. “*Diseño de pavimentos asfálticos para calles y carreteras*”. En: [http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina\\_via/modulos/MODULO%2012.pdf](http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%2012.pdf) [Acceso 9 septiembre 2016]

Señalamiento vial de Centro América S.A [SEVICASA]. (2012). En: <http://www.sevicasa.com/prospeccion-geofisica-ensayo-fwd/> [Acceso 18 de septiembre 2016]

Serrano, J. 2002 “*Utilización del deflectómetro de impacto en la evaluación estructural de firmes*” Pg 5-19

Sierra, G. 2008. "Producción de hidrógeno y nanotubos de carbono por descomposición de metano sobre  $Ni^{\circ}/La_2O_3$  obtenido a partir de la perovskita  $LaNiO_3-\delta$ ". En: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302008000200001&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302008000200001&script=sci_arttext) [Acceso 12 mayo 2016]

Torres, A. 2007. "Análisis comparativo de costos entre el pavimento flexible y el pavimento rígido". Universidad San Carlos de Guatemala. Guatemala. 257 págs.

Universidad de Piura. (2013) "Capítulo I: Método AASHTO 93 para el diseño de pavimentos rígidos" En: [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_102\\_181\\_62\\_936.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_102_181_62_936.pdf) [Acceso 9 septiembre 2016]

Universidad Nacional de Colombia. "Ensayo de compactación proctor modificado". Facultad de Minas [Sin Fecha] <http://www.unalmed.edu.co/~geotecni/GG-17.pdf> [Acceso 10 mayo 2016]

Vera, J. 2009. "Filamentos de carbono en hormigones" Acciona infraestructuras. No. 14 pag 2-8.

Webb, J. 2015 "Así logran convertir el CO2 en codiciadas nanofibras de carbono". [20 agosto 2015] En: [http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/08/150820\\_c02\\_nanofibras\\_carbono\\_lp](http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/08/150820_c02_nanofibras_carbono_lp) [Acceso 16 de junio 2016]

Youssef, M., Al Zahr, S., & Gagnaire, M. 2011. "Translucent network design from a CapEx/OpEx perspective. *Photonic Network Communications*", 22(1), 85-97.

Zúñiga, R. 2015. "Mezcla asfáltica en caliente". Laboratorio nacional de Vialidad, Chile. 52 pags

## IX. ANEXOS

### A. Hoja de cálculo - ESAL

TIPO DE VEHÍCULO	PESO EJES (TON)				CÁLCULO FACTOR DE EQUIVALENCIA				Fe
	SIMPLE-SIMPLE	SIMPLE-DOBLE	TÁNDEM DOBLE	TRIDEM DOBLE	SIMPLE-SIMPLE	SIMPLE-DOBLE	TÁNDEM DOBLE	TRIDEM DOBLE	
AUTOMOVIL									0.0004
PICKUP									0.0018
C2	5,5	10			0.482253086	2.211793566	0	0	2.6940
C3	5,5		16.5		0.482253086	0	1.4641	0	1.9464
C4	5			20	0.329385347	0	0	0.571753246	0.9011
T2-S1	5	2 ejes 9 TON			0.329385347	2.902315518	0	0	3.2317
T2-S2	5	9	16		0.329385347	1.451157759	1.294538272	0	3.0751
T3-S1	5	9	16		0.329385347	1.451157759	1.294538272	0	3.0751
T3-S2	5		2 ejes 16 TON		0.329385347	0	2.589076543	0	2.9185
T3-S3	5		16	20	0.329385347	0	1.294538272	0.571753246	2.1957
T2-S3	5	9		20	0.329385347	1.451157759	0	0.571753246	2.3523
MICROBUS	2 ejes 3 TON				0.10377589	0	0	0	0.1038
AUTOBUS	5	8			0.329385347	0.905950645	0	0	1.2353

TIPO DE VEHÍCULO	TRÁNSITO DIARIO DE VEHÍCULO	PORCENTAJE
AUTOMÓVIL	11391	81.05%
PICK UP	1619	11.52%
C2	358	2.55%
C3	16	0.11%
C4	11	0.08%
T3-S2	9	0.06%
T3-S3	13	0.09%
MICROBÚS	451	3.21%
AUTOBÚS	187	1.33%
<b>TPD</b>	<b>14055</b>	

Fca 0.8

Fd 0.5

Vc 0.074350765

TIPO DE VEHÍCULO	TRÁNSITO DIARIO	PORCENTAJE DE TIPO DE VEHÍCULO TRANSITADO	FACTOR DE AGRESIÓN POR TIPO DE VEHÍCULO (Fe)	PORCENTAJE DE (Fe) POR TIPO DE VEHÍCULO
AUTOMÓVIL	11391	81.05%	0.000324184	0.34%
PICKUP	1619	11.52%	0.000207343	0.22%
C2	358	2.55%	0.068621039	71.67%
C3	16	0.11%	0.002215699	2.31%
C4	11	0.08%	0.000705267	0.74%
T2-S1	0	0.00%	0	0.00%
T2-S2	0	0.00%	0	0.00%
T3-S1	0	0.00%	0	0.00%
T3-S2	9	0.06%	0.001868812	1.95%
T3-S3	13	0.09%	0.002030864	2.12%
T2-S3	0	0.00%	0	0.00%
MICROBUS	451	3.21%	0.003329984	3.48%
AUTOBUS	187	1.33%	0.016435989	17.17%
<b>TPD</b>	<b>14055</b>		$\sum Fe$ 0.095739181	100%
			$FeCG = \sum Fe / Vc$ 1.28766908	

$N_{\text{diario}}$  538.25

Proyección de ejes equivalentes diarios

Fp 30.36974719  
R 0.04  
n 20 años

**ESAL 5,966,430.56**

## B. Hoja de cálculo - Método de diseño AASHTO 1993 para pavimento asfáltico

### Pavimento Asfáltico - Método AASHTO 1993

Tráfico 5,966,431 ESAL

Calculo del número estructural (SNreq)	
<b>DATOS PARA DISEÑO</b>	
ESAL (W18)	5,966,431
Zr	-1.03700
R	85%
So	0.50
$\Delta$ IPS	2.2
Po	4.2
Pf	2
Mr	12000.0 psi
<b>SN</b>	<b>3.611</b> el requerido
Interacciones	

MATERIAL  
CONVENCIONAL  
CBR **15**  
Mr **21,300**

#### SN Estructura actual

SIN MODIFICAR

	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>
Carpeta: E <sub>1</sub>	2,450	24,980
Base: E <sub>2</sub>	200	2,039
Subbase: E <sub>3</sub>	100	1,020

#### Coefficiente de aporte estructural

	sin factor	con factor
Carpeta: a <sub>1</sub>	0.3978	0.3659
Base: a <sub>2</sub>	0.1351	0.0691
Subbase: a <sub>3</sub>	0.1059	0.0513

#### Coefficiente de drenaje

Carpeta: C <sub>1</sub>	0.90
Base: C <sub>2</sub>	0.70
Subbase: C <sub>3</sub>	0.60

#### Espesor de la capa

	cm	in
Carpeta: H <sub>1</sub>	10.0	3.937
Base: H <sub>2</sub>	15.0	5.906
Subbase: H <sub>3</sub>	20.0	7.874

a <sub>1</sub> *H <sub>1</sub> *C <sub>1</sub>	1.2967
a <sub>2</sub> *H <sub>2</sub> *C <sub>2</sub>	0.2858
a <sub>3</sub> *H <sub>3</sub> *C <sub>3</sub>	0.2423

**SN (Número Estructural) ACTUAL 1.825**

SN Estructura sobre capa			
<b>SIN MODIFICAR</b>			
	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	
Carpeta: E <sub>1</sub>	2,450	24,980	
Coefficiente de aporte estructural			
Carpeta: a <sub>1</sub>	0.3978		
Coefficiente de drenaje			
Carpeta: C <sub>1</sub>	1		
Espesor de la capa	cm	in	
Carpeta: H <sub>1</sub>	12.0	4.724	
a <sub>1</sub> *H <sub>1</sub> *C <sub>1</sub>	1.8792		
<b>SN (Número Estructural) SOBRE CAPA</b>	<b>1.879</b>		
SN total	3.704		
SN requerido	3.611		
<b>MODIFICADO CON CNTF</b>			
	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>	
Carpeta: E <sub>1</sub>	3,750	38,235	
Coefficiente de aporte estructural			
Carpeta: a <sub>1</sub>	0.4892		
Coefficiente de drenaje			
Carpeta: C <sub>1</sub>	1		
Espesor de la capa	cm	in	
Carpeta: H <sub>1</sub>	10.0	3.937	
a <sub>1</sub> *H <sub>1</sub> *C <sub>1</sub>	1.9259		
<b>SN (Número Estructural) SOBRECAPA MOD</b>	<b>1.926</b>		
SN total	3.751		
SN requerido	3.611		

### C. Hoja de cálculo - Método de diseño AASHTO 1993 para pavimento rígido

#### DISEÑO PAVIMENTO CONCRETO HIDRÁULICO

Metodología AASHTO 1993

#### Whitetopping

Ejes equivalentes	5,966,430.56	
DR (espesor losa)	<b>10.048</b>	in
Zr	-1.03700	
R	85%	
K	1000.00	lb/pulg <sup>3</sup> (PCI)
So	0.5	
Po	4.5	
Pt	2	
ΔIPS	2.5	
Sc	<b>600</b>	psi
Ec	<b>2563218</b>	psi
Cd Coeficiente de drenaje	1	
Porcentaje de transferencia carga	80	%
J (Joint transfer factor)	3.2	

**DISEÑO PAVIMENTO CONCRETO HIDRÁULICO MODIFICADO***Metodología AASHTO 1993***Whitetopping modificado**

Ejes equivalentes	5,966,430.56	
DR (espesor losa)	<b>8.825</b>	in
Zr	-1.03700	
R	85%	
K	1000.00	lb/pulg <sup>3</sup> (PCI)
So	0.5	
Po	4.5	
Pt	2	
ΔIPS	2.5	
Sc	<b>762</b>	psi
Ec	<b>6287356</b>	psi
Cd Coeficiente de drenaje	1	
Porcentaje de transferencia carga	80	%
J (Joint transfer factor)	3.2	