

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**NANOTECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA CAPA DE BASE
EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO**

Trabajo de graduación presentado por Julio Antonio Lam López para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2017

**NANOTECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA CAPA DE BASE
EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**NANOTECNOLOGÍA PARA EL MEJORAMIENTO DE LAS
PROPIEDADES MECÁNICAS DE UNA CAPA DE BASE
EN ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO**

Trabajo de graduación presentado por Julio Antonio Lam López para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2017

Vo. Bo:

(f) 

Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Mario Rodrigo Rubio Haasler

Mario Rodrigo Rubio Haasler
Ingeniero Civil
Colegiado No. 12243

(f) 

Ing. Roberto Godó Levensen

(f) 

Ing. Diego Iglesias

Fecha de aprobación: Guatemala, 5 de diciembre de 2017

PREFACIO

La inexistencia de planes efectivos de estructuras viales es un factor que ha afectado a Guatemala a lo largo de mucho tiempo. La alta necesidad por investigar nuevas alternativas para erradicar este problema es vital para el desarrollo. El presente trabajo está destinado a aquellas personas que estén interesadas en conocer nuevas alternativas como lo es la modificación de asfaltos en estructuras de carreteras, por medio de materiales reciclados como lo son las fibras de carbono provenientes de subproductos de la industria del caucho y papel.

El objetivo principal de esta investigación es modificar y analizar físico-mecánicamente un material de base estructural modificado con micro fibras de carbono, para luego evaluar su aporte en la estructura de pavimento. Todos los materiales, equipo y resultados realizados en este trabajo de graduación se realizaron en los laboratorios de las empresas SERPIN y CONCAL, se agradece a ambas empresas por haber permitido el manejo de los resultados a lo largo de la investigación. También, agradezco al Ingeniero Mario Rodrigo Rubio Haasler por compartir su conocimiento de estos temas y por darme el apoyo sustancial a lo largo de este trabajo. Finalmente, quiero agradecer a mis padres, hermanos y compañeros que estuvieron al tanto del proceso de elaboración de este trabajo de graduación.

CONTENIDO

PREFACIO	iii
LISTA DE CUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMEN	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN	2
III. OBJETIVOS	4
A. General.....	4
B. Específicos	4
IV. ANTECEDENTES	5
V. MARCO TEÓRICO	8
A. Nanotecnología	8
1. Nanotecnología	8
2. Nanociencia.....	9
3. Carbono.....	9
4. Fibras de carbono.....	9
5. Obtención de fibras de carbono mediante caucho	10
a. Vía seca.....	11
b. Vía húmeda	12
B. Concreto	13
1. Cemento	13
2. Clinker	13
3. Cemento portland.....	13
4. Cementos verdes.....	14
C. Conceptos básicos	14

1.	Gravedad específica.....	14
	a. Real.....	15
	b. Aparente.....	15
2.	Peso unitario.....	15
3.	Plasticidad.....	15
4.	Límite líquido.....	15
5.	Límite plástico.....	15
6.	Índice de plasticidad.....	15
7.	Emulsión asfáltica.....	16
9.	Coeficiente de drenaje.....	17
10.	Índice de serviciabilidad.....	17
D.	Tipos de ensayo.....	19
1.	Ensayo de compresión inconfiada.....	19
2.	Ensayo de módulo de resiliencia.....	19
3.	Ensayo de CBR.....	20
4.	Ensayo de límites de consistencia:.....	20
	a. Límite líquido.....	20
	b. Límite plástico.....	21
5.	Ensayo de granulometría.....	22
6.	Ensayo de compactación proctor.....	23
7.	Ensayo para peso unitario.....	24
8.	Ensayo para gravedad específica.....	25
9.	Ensayo de abrasion.....	25
10.	Ensayo de equivalente de arena.....	26
11.	Ensayo de penetración.....	26
12.	Ensayo de punto de ablandamiento.....	27
13.	Ensayo estabilidad y flujo marshall.....	28
E.	Pavimentos.....	28

1.	Pavimento flexible.....	28
2.	Pavimento rígido.	29
3.	Pavimento semirígido	30
4.	Pavimento compuesto	30
5.	Ligante.....	30
6.	Ligante hidráulico	30
7.	Ligante asfáltico.....	31
8.	Estructura de una carretera	31
	a. Sub base	31
	b. Capa de rodadura.....	31
	c. Capa base.....	31
	d. Capa superficial	31
9.	Capa de base de un pavimento	32
VI.	METODOLOGÍA.....	33
VII.	RESULTADOS	45
	A. Ensayo de granulometría	45
	B. Ensayo de límites de consistencia (Atterberg)	50
	C. Ensayo de peso unitario y gravedad específica.....	51
	D. Ensayo de equivalente de arena.....	53
	E. Ensayo de desintegración al sulfato de sodio	54
	F. Ensayo de abrasión (máquina de los ángeles).....	57
	G. Ensayo de caras fracturadas	57
	H. Ensayo estabilidad y flujo marshall.....	58
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
IX.	CONCLUSIONES.....	65
X.	RECOMENDACIONES	66
XI.	BIBLIOGRAFÍA	67

LISTA DE CUADROS

Cuadro No. 1 Granulometría integrada tipo C-2	45
Cuadro No. 2 Granulometría de agregados $\frac{3}{4}$ "	46
Cuadro No. 3 Granulometría de agregados $\frac{3}{8}$ "	47
Cuadro No. 4 Granulometría de arena de río	48
Cuadro No. 5 Granulometría de filler	49
Cuadro No. 6 Límites de consistencia de granulometría integrada tipo C-2....	50
Cuadro No. 7 Peso unitario y gravedad específica de granulometría integrada tipo C-2.....	51
Cuadro No. 8 Peso unitario y gravedad específica de agregado $\frac{3}{4}$ "	52
Cuadro No. 9 Peso unitario y gravedad específica de agregado $\frac{3}{8}$ "	52
Cuadro No. 10 Peso unitario y gravedad específica de arena de río	52
Cuadro No. 11 Peso unitario y gravedad específica de filler	52
Cuadro No. 12 Ensayo de equivalente de arena en granulometría integrada tipo C-2.....	53
Cuadro No. 13 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en agregados $\frac{3}{4}$ "	54
Cuadro No. 14 Porcentaje de desgaste químico en agregados $\frac{3}{4}$ "	54
Cuadro No. 15 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en arena de río	55
Cuadro No. 16 Porcentaje de desgaste químico en arena de río	55
Cuadro No. 17 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en arena de río	56
Cuadro No. 18 Porcentaje de desgaste químico en arena de río	56
Cuadro No. 19 Ensayo de abrasión en agregado $\frac{3}{4}$ "	57
Cuadro No. 20 Ensayo de abrasión en agregado $\frac{3}{8}$ "	57
Cuadro No. 21 Resultado de caras fracturadas.....	57
Cuadro No. 22 Resultado del factor para ensayo convencional	61

Cuadro No. 23 Resultado del factor para ensayo modificado	61
Cuadro No. 24 Número estructural para 5 y 10 años	62
Cuadro No. 25 Espesor requerido para un número estructural de 5 años del ensayo requerido.....	62
Cuadro No. 26 Espesor requerido para un número estructural de 5 años del ensayo requerido.....	62
Cuadro No. 27 Datos de la base	63
Cuadro No. 28 Volumen de la base.....	63
Cuadro No. 29 Costo de la base	63

LISTA DE FIGURAS

Figura No. 1	Propiedades de las fibras de carbono.....	10
Figura No. 2	Proceso de digestión del caucho	11
Figura No. 3	Proceso de adición del caucho vía seca.....	12
Figura No. 4	Proceso de adición del caucho vía húmeda	13
Figura No. 5	Emulsiones asfálticas	16
Figura No. 6	Relación del PSI con IRI	18
Figura No. 7	Ensayo límite líquido.....	21
Figura No. 8	Ensayo límite plástico	22
Figura No. 9	Clasificación de los materiales según ASTM	23
Figura No. 10	Molde utilizado en el ensayo de compactación proctor.....	24
Figura No. 11	Equipo para ensayo de penetración	27
Figura No. 12	Capas de un pavimento flexible	28
Figura No. 13	Pavimento rígido	29
Figura No. 14	Sección de una carretera	32
Figura No. 15	Suelo a ensayar para la base	33
Figura No. 16	Tamices a utilizar para el ensayo de granulometría.....	34
Figura No. 17	Ensayo de granulometría	35
Figura No. 18	Resultado del ensayo de granulometría	35
Figura No. 19	Equipo de ensayo de límites de consistencia	36
Figura No. 20	Molde del ensayo proctor.....	37
Figura No. 21	Ensayo proctor modificado	37
Figura No. 22	Molde Utilizado para el ensayo CBR	38
Figura No. 23	Máquina del ensayo CBR	38
Figura No. 24	Muestra de agregados a ensayar	39
Figura No. 25	Manual del ensayo equivalente de arena	40
Figura No. 26	Probetas del ensayo equivalente de arena	41

Figura No. 27 Ensayo equivalente de arena	41
Figura No. 28 Preparación de briqueta de asfalto y agregados.....	42
Figura No. 29 Peso de briqueta para ensayo estabilidad y flujo marshall	43
Figura No. 30 Briqueta puesta a prueba para ensayo estabilidad y flujo marshall.....	44
Figura No. 31 Curva granulométrica integrada tipo C-2	45
Figura No. 32 Curva granulométrica de agregados ¾”.....	46
Figura No. 33 Curva granulométrica de agregados 3/8”.....	47
Figura No. 34 Curva granulométrica de arena de río	48
Figura No. 35 Curva granulométrica de filler	49
Figura No. 36 Curva de límites de consistencia de granulometría integrada tipo C-2.....	51
Figura No. 37 Ensayo de equivalente de arena en granulometría integrada tipo C-2.....	53
Figura No. 38 Ensayo estabilidad marshall vs porcentaje de emulsión en capa base modificada.....	58
Figura No. 39 Ensayo fluencia vs porcentaje de emulsión en capa base modificada	59
Figura No. 40 Ensayo estabilidad marshall vs porcentaje de emulsión en capa base convencional	59
Figura No. 41 Ensayo fluencia vs porcentaje de emulsión en capa base convencional.....	60

RESUMEN

Los nanomateriales son estructuras cuyas dimensiones llegan a ser menores a 100 nm y que llegan a ser estudiados por la nanotecnología, la cual es la ciencia que se encarga de estudiar, diseñar y fabricar nanomateriales. A la aplicación de los nanomateriales se le llama nanociencia, los nanomateriales pueden fabricarse de diferentes formas, en forma de nanopolvos y de nanopartículas.

Las nanofibras de carbono son nanopartículas de peso liviano, estas poseen una elevada resistencia, al igual que un alto módulo de elasticidad. A estas se les compara comúnmente con los nanotubos de carbono, la diferencia entre estos dos materiales es que los nanotubos de carbono son diseñados molecularmente, por consiguiente, sus características de aplicación son mejores. Debido a esto, el valor en el mercado tiende a ser elevado, por otro lado, las nanofibras de carbono son más fáciles de producir, ya que no son diseñadas ni se controla rigurosamente su morfología.

Existen varias aplicaciones de los nanomateriales, estos tienen un campo de estudio amplio, sin embargo, no hay suficientes estudios relacionados a este tema en Guatemala. A nivel mundial se han estudiado cerámicas nanoestructuradas, materiales ferromagnéticos, concreto modificado etc; sin embargo, hay muy poca literatura sobre bases estructurales. La modificación de estos pavimentos aumenta significativamente su desempeño y permiten reducir sus espesores para disminuir el consumo de recursos naturales.

En este trabajo se estudia una capa de base de la estructura de un pavimento modificada con nanofibras de carbono. Se compara una capa de base de pavimento modificada con una tradicional. A la base modificada se le agrega un 3% de nanofibras de carbono según el peso de la estructura. Se realizaron diferentes ensayos para comprobar si en efecto el utilizar nanofibras mejora las propiedades de los materiales asfálticos.

Esta investigación permite conocer la versatilidad del uso de nanofibras de carbono en los diferentes materiales estabilizados con ligantes bituminosos, de mejorar el desempeño de los materiales y conocer fuentes de obtención para los modificadores. También motiva a otros usuarios a investigar de otras fuentes de obtención de nanofibras.

I. INTRODUCCIÓN

Las carreteras de mezcla asfáltica están formadas por una mezcla de agregados pétreos y ligante asfáltico (bitumen o asfalto). El ligante asfáltico es un derivado del petróleo, del cual se necesita mucha energía para producirlo, además, en el proceso de extracción del petróleo, este libera una cantidad excesiva de calor. La huella de carbono ha aumentado, hoy en día la cantidad de CO₂ producida por el ser humano, de manera directa o indirecta, es exagerada. El petróleo no es utilizado únicamente para construir carreteras, también se utiliza para generar energía, calor, etc. Además de no ser un recurso no renovable, este está agotándose rápidamente, por lo que la necesidad de aprovechar más este recurso es vital para el progreso de la sociedad. Existen dos formas para darle solución a este grave problema. Una de ellas es fabricando carreteras con mayor espesor en sus capas, para que estas puedan tener una vida útil más larga. La otra solución es utilizar materiales para aprovechar sus propiedades y de esta manera mejoren el desempeño de estas estructuras.

La presente investigación presentada en forma de tesis se enfocará en comparar dos tipos de estructuras de pavimentos. Para ser más explícitos, se modificará la base de una carretera utilizando nano fibras de carbono y la otra será una base de carretera convencional. Ambas bases se verán tratadas mediante diferentes ensayos para su respectiva formación, para que luego se le realicen otros ensayos y de esta manera determinar si en efecto las nano fibras de carbono aportan mejor desempeño a la base de una carretera.

Los ensayos realizados a ambas bases serán los siguientes: granulometría, compactación Proctor, peso unitario, gravedad específica, abrasión y equivalente de arena, desintegración al sulfato de sodio, caras fracturadas y caras alargadas. También al asfalto se le realizarán los siguientes ensayos: penetración y punto de ablandamiento. Como se mencionó antes, ambas bases iban a tratarse con los mismos ensayos, su única diferencia sería el agregarle fibras de carbono a una de ellas. Por último, se les ensayaría mediante el ensayo estabilidad y flujo Marshall para determinar su desempeño ante la fatiga.

II. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo se realizó por las siguientes razones. Una de ellas es proponer un material modificado a menor escala que permita aprovechar las características físico-mecánicas de los nano y micro aditivos para mejorar el desempeño en estructuras de pavimento. También, para crear un impacto en la Ingeniería verde en la implementación de mezclas que permitan la optimización de recursos naturales. La huella de carbono, la cual es la cantidad de gases emitidos por el ser humano (CO₂), ya sea directa o indirectamente, está aumentando. La producción del bitumen, el cual es un derivado del petróleo, produce mucho calor y CO₂. Este proviene de residuos fósiles que se encuentran debajo del suelo, lo que lo hace un material no renovable. Para obtener petróleo se necesita excavar a altas profundidades de manera que se encuentren pozos de esta fuente fósil. Adicionando a esto, el petróleo es utilizado para muchas otras funciones, como lo son para la obtención de fuentes de calor, luz, combustible, etc. La demanda del petróleo está por encima de la capacidad de este, por lo que se necesitan utilizar materiales que lo sustituyan o bien que se alargue el tiempo de vida útil de este. En la industria, existen materiales que se utilizan una sola vez y luego se clasifican como desechos por desconocimiento de las aplicaciones que se les pueden dar, el beneficio puede ser alto tanto para la ingeniería estructural como para la ingeniería ambiental.

Con los micro o nanomateriales se pretende aumentar la resistencia a la compresión confinada en bases estructurales modificadas con ligante hidráulico y aumentar el módulo de elasticidad en bases estructurales modificadas con ligante asfáltico, ya que son parámetros de diseño estructurales en pavimentos rígidos y flexibles.

En Guatemala muchas veces se utilizan metodologías obsoletas de diseño, además de no existir un control de pesos y dimensiones estricto para los vehículos que transitan en las vías del país. Adicionalmente, se necesita estudiar mayormente la composición química de los agregados en Guatemala, conocer sus características y compatibilidades.

Otra razón es porque la necesidad de diseñar materiales con mejor desempeño que permitan incrementar la vida útil de las carreteras es urgente, el objetivo es contrarrestar la descontrolada aplicación de cargas dinámicas en la red vial del país. Es importante mencionar que la depreciación de los vehículos aumenta al no tener materiales que cumplan con los parámetros de servicio en el diseño.

Uno de los mayores problemas en Guatemala es la inexistencia de planes efectivos de mantenimiento para proyectos viales, entonces, se debe empezar por diseñar estructuras con vidas útiles de más de 20 años para asegurar un desempeño dentro de la curva de serviciabilidad. Las dos opciones más frecuentes para aumentar la vida útil de un pavimento es aumentando los espesores o modificando los materiales de las capas estructurales.

Finalmente, Guatemala es un país en vías de desarrollo, se tiene que empezar a preparar para la evaluación de materiales modificados ya que no se puede aplicar la misma normativa o especificaciones que a un proyecto estándar. El incentivar a empresas y personal a utilizar nano y micro materiales para la mejora de una matriz macro y así promover la actualización en ciencia de los materiales. La idea es desarrollar normativas y estándares dedicados únicamente al empleo de nano y micro materiales que sean de gran utilidad para otras personas y países a realizar otros estudios.

III. OBJETIVOS

A. General:

- Modificar y analizar físico-mecánicamente un material de base estructural modificado con micro fibras de carbono.

B. Específicos:

- Caracterizar los agregados a utilizar por medio de los ensayos de Abrasión, partículas planas y alargadas, caras fracturadas, equivalente de arena, peso unitario y gravedad específica.
- Evaluar la resistencia a la compresión inconfiada y módulo de elasticidad del material modificado y sin modificar.
- Analizar los beneficios en función de optimización estructural y durabilidad de un material de base modificado con un micro o nano material.

IV. ANTEDECENTES

Se han realizado investigaciones de cómo actúa un cemento Portland al agregársele partículas de tamaño nano. Estas son: nano sílice, nano alúmina, óxidos de hierro y de titanio nanométricos, cenizas de magnetita, nanotubos de carbono y cenizas volantes ultra finas. Estas partículas alteraban de alguna manera la resistencia mecánica del cemento Portland.

Björnström, J *et al* (2004) evaluó cómo reaccionaba el cemento al hidratársele, siendo este alterado con nano adiciones. Las adiciones consistían en partículas con sílice coloidal (5 nm y 500 m²/g) a un cemento compuesto por alita (C3S) pura.

También, se han realizado estudios en concretos modificados. Según la revista de *Energía Química y Física*, se abordó la incorporación de materiales nanométricos de dióxido de titanio en una matriz de concreto. Estos fueron agregados superficialmente y como un ingrediente activo en el concreto. Se evaluaron las propiedades que estos nanomateriales iban a aportar al concreto modificado, las cuales eran auto limpiantes y de resistencia. Mediante pruebas de difracción (DRX), microscopías electrónicas de barrido (MEB), pruebas de resistencia a la compresión y degradación de materiales contaminantes.

Otra aplicación que se le han dado a los nanomateriales es en la modificación de la matriz de un ligante asfáltico. El Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales Lanamme (UCR) realizó un estudio en donde se agregó nano sílica y nano tubos de carbón de doble capa a un ligante correspondiente a un PG64-22. Para la evaluación de este asfalto, se realizaron pruebas de caracterización superficial, morfológicas, reológicas y de termoanálisis, como Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), Análisis Termogravimétrico (TGA), análisis Infrarrojo FTIR, RAMAN, Microscopía de Fuerza Atómica AFM. Estas pruebas sirvieron de finalidad de asegurar el buen desempeño del asfalto y para evidenciar la mejora de este.

Los altos costos de los combustibles motivan a las empresas a desarrollar métodos de refinación más eficientes, provocando así que la calidad de los asfaltos vaya en decadencia. Es por esta razón por la que el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme UCR) y el Laboratorio Nacional de Nanotecnología (LANOTEC) han desarrollado estudios sobre la modificación de asfaltos por medio de nanomateriales, entre ellos se destacan los polímeros. La variedad de polímeros y sus propiedades hacen que a la hora de modificar un asfalto, estos tengan un comportamiento diferente en un asfalto. Estos modificadores son

utilizados para mejorar las propiedades del asfalto y su desempeño en su vida útil. Específicamente a trabajar en la deformación permanente, la fatiga, el agrietamiento térmico, la adhesividad, y el daño por la humedad. Por medio de técnicas descritas en el párrafo anterior a este, se ha obtenido información física y química permite diseñar un proceso de modificación.

Detallando más del tema de los nano polímeros en los asfaltos, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (Lanamme UCR) ha realizado un estudio en donde utilizan la bolsa de polietileno con la que se cubren los racimos de banano para modificar un asfalto AC-30. Este estudio se realizó con el objetivo de disminuir el impacto ecológico que produce este, y para clasificarlo a la hora de determinar la factibilidad de usarlo como modificante de asfalto. El material fue evaluado químicamente con espectroscopia RAMAN, pruebas calorimétricas con el DSC y el TGA. Se obtuvo que la degradación del bitumen comienza en los 150°C y a los 450°C su degradación es total. Se compararon ambos asfaltos, el original y el modificado, realizando en ellos cromatografía IATROSCAN y espectroscopia infrarroja. También se realizaron pruebas de creep, multi strees creep recovery y fatiga. Se determinó que el material modificante disminuye la deformación en un 50% a 250 ciclos de carga, y se estableció apropiado para utilizarse en rutas secundarias.

En cuanto a la fabricación de las fibras de carbono, se sabe que es un proceso largo y caro, por lo que el usuario utilice otros métodos para la construcción. Sin embargo la Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, ha realizado un estudio sobre la producción de fibras de carbono. La investigación se llama Preparación de materiales de carbono a partir de lignina. Esta investigación trata sobre cómo se pueden fabricar materiales como carbones activos, tamices moleculares de carbón, catalizadores y materiales con alto grado de ordenamiento a partir de la lignina como materia prima. Mediante técnicas fisicoquímicas, de adsorción, espectroscópicas y de reactividad, se han caracterizado dichos materiales.

La Lanamme UCR ha realizado estudios con el fin de reducir el impacto de las llantas que se desechan y darles un uso. Este sería para la modificación en forma de agregado de pavimentos asfálticos. Una llanta está compuesta por Caucho Natural (14 a 27%), Caucho Sintético (14 a 27%), Acero (14 a 15%), etc. También posee diferentes tipos de químicos, desde carbono (70%) hasta azufre (1.3%). Entonces mediante trituración y molienda, se reduciría el material de las llantas a un tamaño de partícula entre 0.5mm y 0.2mm, dependiendo de la

aplicación. De esta manera el material se utilizaría como modificador del asfalto o como mejorador de la mezcla asfáltica.

Existen diferentes usos de los nanomateriales, como por ejemplo el Sílice (SiO_2), el cual es utilizado para mejorar la resistencia al rayado y a la abrasión en revestimientos, pinturas, tintas y adhesivos. El óxido de cerio (CeO_2) que es utilizado en conectores ópticos, catalizadores y membranas cerámicas de alta resistencia a la fractura, e implantes biomédicos.

Este trabajo de graduación es el seguimiento y continuación de otras dos tesis, las cuales son las siguientes: "Nanotecnología para el mejoramiento de las propiedades mecánicas y térmicas en materiales convencionales dentro de la ingeniería Civil" realizada por el Ingeniero Civil Andrés Pira y "Estudio de Pre factibilidad para la aplicación de nano fibras y nanotubos de carbono (CNTF) en pavimentos de concreto asfáltico e hidráulico" realizada por el Ingeniero Juan Pablo De La Riva. Si se desea obtener más información de dichas tesis, estas se encuentran en el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad del Valle de Guatemala.

V. MARCO TEÓRICO

A. Nanotecnología

1. Nanotecnología. Unión de la ciencia con la ingeniería para el mejoramiento de materiales por medio de la aplicación de objetos de tamaño muy pequeño. Esta se encarga en estudiar, diseñar y fabricar materiales para darle de cierta manera un uso práctico. El prefijo “nano” proviene de la unidad de medida, la cual equivale a una milmillonésima parte, es decir $1/1\ 000\ 000$. También, se le conoce a la nanotecnología a la habilidad de manipular materia del tamaño de un átomo. (Serena. 2009)

Nanotecnología se puede definir de igual manera como “Ingeniería con precisión atómica”. Ya que esta es la habilidad de trabajar en el nivel molecular, átomo por átomo, para crear estructuras largas con una organización molecular fundamental. Esta va de la mano con la física, química y biología, creando así una unión de ramas para crear algo.

Puede aportar por lo menos tres distintas ventajas:

- Ofrece la posibilidad de crear materiales con nuevas combinaciones de propiedades.
- Los dispositivos en nano escala son fabricados con menor cantidad de material, utilizan menor cantidad de energía y tienen una amplia gama de accesibilidad.
- Ofrece una tecnología de fabricación universal, siendo así la nano fábrica personal. (Ramsden, 2017)

2. **Nanociencia.** Estudio de los materiales o aplicación de estos en estructuras de un tamaño entre 1 y 100 nanómetros. Estas se conocen como nano estructuras. (Desconocido. 2007)

3. **Carbono.** Elemento que se puede encontrar en varias formas polimórficas, también en estado amorfo. Este material no se puede clasificar como metal, cerámico o polímeros. (Callister, 2005).

Este es uno de los elementos más abundantes presente en los organismos vivos, junto con el oxígeno e hidrógeno. A nivel de material, no es un elemento abundante, se encuentra en pequeña cantidad en la tierra. A pesar de esto, es un elemento que se conoce enormemente por su uso frecuente y la facilidad con la que se obtiene. (Ritter, 1966)

4. **Fibras de carbono.** Se caracterizan por tener una elevada resistencia, un elevado módulo de elasticidad, y ser un material ligero. Su composición química puede ser muy diversa, los materiales más utilizados como precursores de las fibras de carbono son el poliacrilonitrilo (PAN), el alquitrán y la celulosa. Las nanofibras de carbono son, a diferencia de los nanotubos de carbono, más fáciles y baratas de fabricar. (Besednjak, 2005)

Para ser fibras de carbón estas deben poseer al menos un 92% de carbón en su composición. Pueden ser alargadas o cortas. Su estructura puede ser cristalina, amorfa, o parcialmente cristalina. La forma cristalina tiene la misma estructura que el grafito. (Chung, 2016)

Figura No. 1 Propiedades de las fibras de carbono

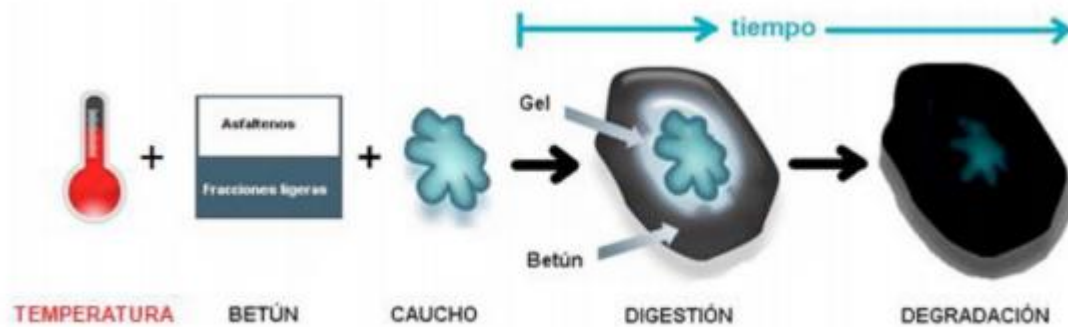
<i>Tipo</i>	<i>Vidrio E</i>	<i>Vidrio R/S</i>	<i>Vidrio C</i>
<i>Resistencia a la tracción (GPa)</i>	3,4 – 3,5	3,4 – 4,6	3,1
<i>Módulo elástico (GPa)</i>	72 -73	85 - 87	71
<i>Densidad (Kg/m³)</i>	2600	2500 - 2530	2450
<i>Alargamiento a la rotura (%)</i>	3,3 – 4,8	4,2 – 5,4	3,5
<i>Resistencia específica (GPa * cm³/g)</i>	1,3 – 1,35	1,7 – 1,85	1,3
<i>Módulo E específico (GPa * cm³/g)</i>	27,7 – 28,2	34 – 34,9	29
<i>Chef. Transmisión térmica (10⁻⁶°K)</i>	5	4 – 5,1	7,2
<i>Diámetro del filamento (µm)</i>	8 -20	10	20

(Besednjak, 2005)

5. Obtención de fibras de carbono mediante caucho. Mediante el uso de llantas usadas, la Lanamme UCR ha hecho una investigación en donde, por medio de trituración y molienda de dichos materiales (llantas), se crea un polvo, el cual puede ser utilizado como modificador de ligante o mezcla asfáltica.

La composición química del caucho se determina mediante la prueba de 14C (Carbono 14) que identifica el caucho natural. La densidad aparente de este material por lo general tiene un valor de 500kg/m³, pero debido a factores como la fuente de la llanta y la granulometría, este valor puede variar. La granulometría puede variar desde 3mm a partículas de tamaño pequeño. Es recomendable utilizar partículas de un tamaño menor a 0.8mm para favorecer la digestión.

Figura No. 2 Proceso de digestión del caucho



Existen dos tipos de incorporación del caucho.

a. **Vía seca.** Se agrega el polvo de caucho directamente con los agregados antes de incorporar el ligante al mezclador. Se agrega entre un 1% y 3% con respecto a la masa del agregado, con tamaños cercanos a 2mm hasta 6.3mm.

Cabe resaltar que el caucho debe agregarse con los agregados calientes y combinarse con el asfalto en el mezclador a una temperatura convencional de 160°C y 180°C. Luego se debe dejar reposar la mezcla, para que se produzca la digestión del caucho.

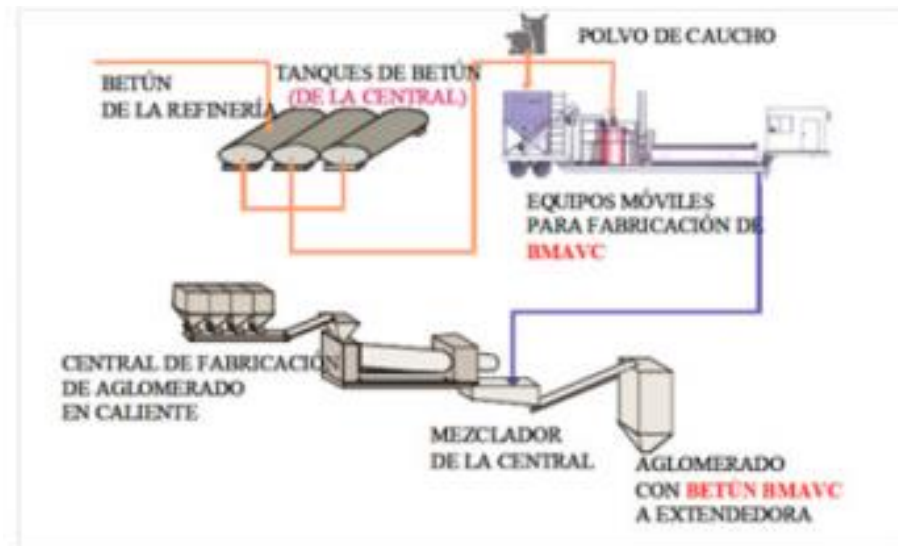
Figura No. 3 Proceso de adición del caucho vía seca



b. **Vía húmeda** El caucho se combina con el asfalto antes de mezclarlo con el agregado. Para este proceso es indispensable equipo y sistemas, como por ejemplo sistemas de alimentación del caucho, tanques de calentamiento y agitación, tanques de reacción y tanques de almacenamiento.

En general, se realiza con temperaturas entre 174°C y 200°C y tiempos de mezclado de entre 45 a 60 minutos. Esto es dependiendo de la calidad del caucho y del asfalto. Si se utilizan aditivos la velocidad de agitación deberá cambiar.

Figura No. 4 Proceso de adición del caucho vía húmeda



(Rodríguez, E. 2016)

B. Concreto

1. **Cemento.** Resultado de una mezcla de arcilla y caliza, la cual se lleva al horno y al pasar por un proceso de calcinado, se muele dicho producto generando así un polvo fino (Clinker). Este polvo se mezcla con agua y agregados finos o gruesos (según el uso que se quiera dar) y se forma una pasta, que al fraguar (El agua es menos densa que la mezcla, por lo que al quedar en reposo, el agua sube a la superficie y se seca por medio de evaporación) se forma una piedra artificial con una resistencia específica. (Duda. 2013)

2. **Clinker.** Material sólido formado por un proceso de alta temperatura. Una mezcla de arcillas y caliza pasa por un horno que posee una temperatura alta, luego esta mezcla se fusiona parcial o totalmente. (Lea & Hewlett, 2006)

3. **Cemento portland.** Hecho de una mezcla homogénea de materiales como cal, sílice, una pequeña porción de alúmina, y generalmente óxido de hierro. (Lea & Hewlett, 2006)

Este tipo de cemento es el miembro más importante de la familia de los cementos hidráulicos. La primera patente de cemento "Portland" fue hecha en Inglaterra en el año 1824 por Joseph Aspdin. Este producto en realidad no era un cemento Portland, fue a los 20 años después que se produjo el primer cemento Portland. Desde ese entonces se ha mejorado la producción y expandido los tipos de cemento que se encuentran hoy en día en el mercado. (Nawy, 1997)

4. Cementos verdes. La industria del concreto tiene un impacto ambiental considerable debido al uso de los recursos naturales. Cada tonelada de cemento Portland requiere cerca de 1.5 toneladas de material crudo para su producción. Otro factor que se le puede agregar a esto es la cantidad de CO₂ que se genera a la hora de producir cemento Portland. Debido a esto, investigadores han estado estudiando una forma de reducir el impacto ambiental.

El cemento CEMROCK es producido por Holcim en Europa. Este se caracteriza por mostrar cerca de cero la cantidad de emisión de CO₂ producido durante su producción.

5. Concreto. Material compuesto, creado por el ser humano, el cual es el más utilizado en todo el mundo junto con el agua. Consiste esencialmente de un medio ligante dentro del cual hay partículas o fragmentos de agregado, generalmente una combinación de agregado fino y agregado grueso. El agregado fino puede ser arena y el agregado grueso pedrín o roca triturada. Dependiendo de las especificaciones que el usuario pida, el concreto se compone de los materiales anteriormente mencionados. (Mc Cormac. 2011)

C. Conceptos básicos

1. Gravedad específica. Relación del peso de una partícula al volumen de agua de la misma. Una relación peso a volumen de una muestra de suelo dada. En suelos existen dos gravedades específicas:

- a. **Real.** Considera el volumen absoluto de las partículas.
- b. **Aparente.** Considera el peso de un volumen de suelo en sus condiciones naturales. (Blair, 2017)

2. **Peso unitario.** Cantidad de masa por unidad de volumen. Se expresa en kg/m^3 . (Sánchez, 2001)

3. **Plasticidad.** Es una propiedad que tienen los suelos de poder deformarse, hasta llegar a cierto límite, sin romperse o fracturarse. Este dato puede servir para medir el comportamiento de los suelos en todas las épocas. (Villalaz, 2004)

4. **Límite líquido.** Contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia de estado, de líquido a plástico. (Villalaz, 2004)

5. **Límite plástico.** Se le define al porcentaje de humedad comparado con el peso de la muestra secada al horno. (Villalaz, 2004)

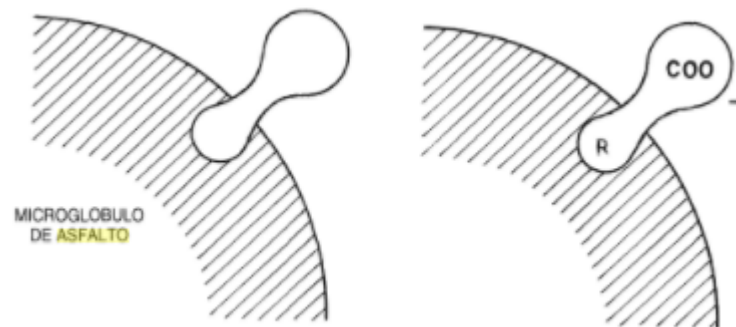
6. **Índice de plasticidad.** Indica el rango de humedad por el cual los suelos con cohesión tienen propiedades de un material plástico. Según Atterberg, cuando un suelo tiene un índice plástico igual a cero, quiere decir que el suelo no es plástico. Cuando es menor de 7, el suelo presenta baja plasticidad. Cuando está entre 7 y 17 quiere decir que es un suelo medianamente plástico. Cuando pasa de 17 tiene un índice altamente plástico. (Villalaz, 2004)

A este se le da la abreviatura IP. Es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico del material que pasa por el tamiz No. 40. Según la norma ASTM D1073 (Standard Specification for Fine Aggregate in Bituminous Paving Mixtures) y la D242 (Standard Specification for Mineral Filler for Bituminous Paving Mixtures), limita el valor del IP del material que pasa por el tamiz No. 40 a un valor de 4 o menos. (Prowell, 2005)

7. **Emulsión asfáltica.** Suspensiones de partículas de producto asfáltico en agua o en una solución acuosa, junto con un agente emulsionante aniónico o catiónico, lo que determina la denominación de la emulsión. La fase continua de las emulsiones es el agua y la fase dispersa es el asfalto.

El emulsionante se fija en la capa que separa el asfalto del agua, con el objetivo de afinar ambas sustancias. Se utilizan compuestos químicos para anclar una parte de las moléculas en las micropartículas de asfalto y en el agua.

Figura No. 5 Emulsiones asfálticas



(Dal-Ré Tenreiro, 2014)

8. **Número estructural SN.** Constituye en una variable que determina un espesor teórico que debe alcanzar para garantizar un nivel adecuado de servicio de la carretera a lo largo de su vida útil proyectada. Cada una de las capas constituye el número estructural necesario. La magnitud de la contribución depende del material utilizado, el coeficiente de la capa y el espesor real de la capa del firme. (Abadía, R. et al. 2015)

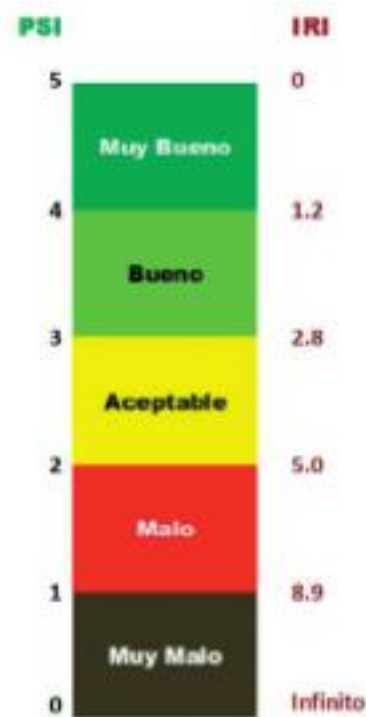
9. **Coefficiente de drenaje.** Representa la cantidad o velocidad del agua cuando es removida por un sistema de drenaje para bajar a una capa freática o acomodarse a la escorrentía superficial. En este estudio de habla de coeficiente de drenaje a la cantidad de agua o velocidad a la que esta es removida por una capa base de carretera. (Stewart, Howell & Trimble, 2011)

10. **Índice de serviciabilidad.** Es el grado en donde un pavimento logra cumplir la función de permitir la circulación de vehículos de una manera fácil, cómoda, rápida y segura. Este va a disminuir a través del tiempo una vez se haya puesto en servicio el pavimento, que estará sometido a cargas circulantes o los agentes meteorológicos.

Se conoce como índice de serviciabilidad presente (present serviciability index) (PSI) y se obtiene de las medidas de rugosidad y los tipos de deterioro para un periodo de tiempo determinado.

La variación del PSI va de 5.0, que es muy bueno, a 0.0, que es muy malo. A la hora de diseñar un pavimento es necesario plantear un índice inicial y final dentro del rango, tomando en cuenta las condiciones del lugar, procesos constructivos, solicitudes, etc.

Figura No. 6 Relación del PSI con IRI



(Espinosa, 2016)

11. Error normal combinado. Toma en cuenta el error o desviación del diseño, la variación de las propiedades de los materiales, la desviación de las propiedades de la capa sub rasante, la variación en la estimación del tránsito en la zona, la variación de las condiciones climáticas, y la variación en el control de calidad de la construcción. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

D. Tipos de ensayo

1. **Ensayo de compresión inconfiada.** Se realiza sobre muestras de suelo cohesivo sin ningún apoyo lateral. Es un ensayo rápido que no abarca la expulsión del agua intersticial. Consiste en una simple prensa, en donde se aplica un esfuerzo distribuido en la cara de la muestra de suelo. (Mañá, 2003)

Al inicio del ensayo, la muestra de suelo no saturado tiene una presión negativa del agua, y la presión del aire se asume como atmosférica. La succión matricial del suelo es similar numéricamente a la presión del agua.

El espécimen de suelo es expuesto a una carga axial hasta que se alcance la falla. El estrés desviador es igual que el estrés principal, debido a que la presión de confinamiento es igual a cero. La carga de compresión debe ser aplicada de manera rápida, para que de esta manera se mantengan las condiciones sin drenar. (Fredlund & Rahardjo, 2007)

2. **Ensayo de módulo de resiliencia.** El material es sometido a diferentes esfuerzos de confinamiento y desviadores. Estos simulan una carga parecida a las que son afectados los pavimentos.

Resiliencia es la cantidad de energía de deformación que recupera un cuerpo al ser sometido a una carga, cuando esta es eliminada. El trabajo realizado para deformar el cuerpo se recupera totalmente cuando se elimina la carga, dentro de los límites de plasticidad. (Fink, Beaty & Carroll, 1984)

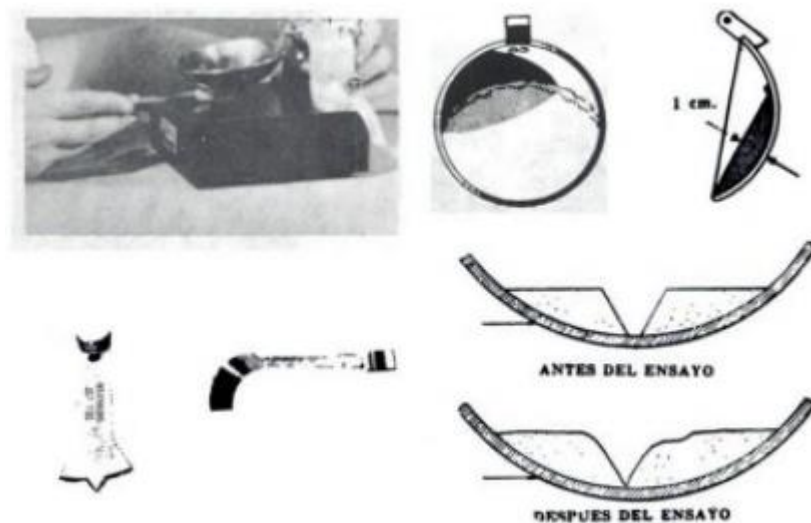
3. **Ensayo de CBR.** Utilizado para estimar la capacidad de soporte de una explanada (corte de una muestra de suelo expuesta). Consiste en someter una muestra de la explanada, compactada y saturada de agua, a un ensayo de penetración con un pistón cilíndrico. De aquí se obtiene el índice CBR. A mayor índice CBR, mayor capacidad de soporte posee la explanada. El índice CBR considera un parámetro de referencia de donde se puede obtener el módulo de elasticidad. ("Proyectos con Adoquín Cerámico (y II)", 2017)

Se llama CBR por sus siglas en inglés, California Bearing Ratio Test. Este ensayo se ha utilizado desde hace mucho tiempo atrás, y forma la base del diseño de pavimentos. Es considerado un método de diseño y de control. Tiene la ventaja de poder ser medido para una variedad de densidades secas, mojadas o sin remojar. Se pueden agregar cargas para simular el efecto de los espesores de construcción. Una vez el diseño del CBR está establecido, puede controlarse en el campo por medio de muestras del sitio y ser examinadas en el laboratorio utilizando equipo CBR, o por procedimiento de CBR insitu. (Trenter, 2009)

4. Ensayo de límites de consistencia.

a. **Límite líquido.** Ensayo Normalizado de Casagrande. Consiste en que dos secciones de una muestra de suelo húmedo deben tocarse cuando la cuchara que las contiene se le hez sometida a un número de impactos. En este ensayo se practica con diferentes humedades, y se anota el número de impactos hasta que ambas secciones se tocan. El límite líquido se considera en 25 impactos. (Caballero, 2010)

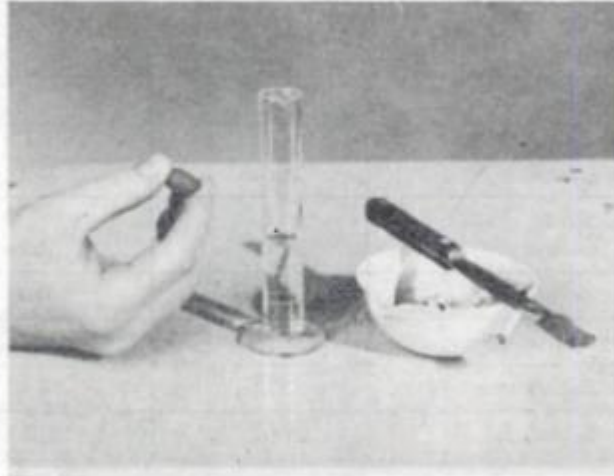
Figura No. 7 Ensayo límite líquido



(Villalaz, 2004)

b. **Límite plástico.** Se pasa por el tamiz 40 una muestra de suelo. Este se amasa y se le da forma de cilindros de 8 gramos de masa y 3 milímetros de diámetro. El amasado puede efectuarse con la palma de la mano o una superficie lisa que no absorba humedad. Se fabrican varios cilindros y en una pesa filtro tarado se determina su humedad. El promedio de humedad es el valor de este límite. (Caballero, 2010)

Figura No. 8 Ensayo límite plástico



(Villalaz, 2004)

5. Ensayo de granulometría. Después de secada la muestra, mediante tamices, se separan los diferentes tipos de suelo de una muestra. Se pesa la cantidad de suelo que queda en el tamiz y en base a esto se obtiene el porcentaje de suelo que pasa acumulado. Con estos datos se puede dibujar una curva granulométrica, la cual muestra de manera más detallada la composición de suelos de la muestra.

La operación del tamizado dependerá del tamaño de los elementos analizados. Por ejemplo, si son elementos pequeños, más larga será la operación del tamizado. Para áridos inferiores a 1/10 de milímetro es imposible realizar un análisis perfecto.

Este ensayo es indispensable para el estudio de un hormigón de calidad. Los elementos más finos son los que más influyen en la medición de la cantidad de agua, la manejabilidad, la compactación, el aspecto del hormigón, etc. (Gorisse, 1981).

Figura No. 9 Clasificación de los materiales según ASTM

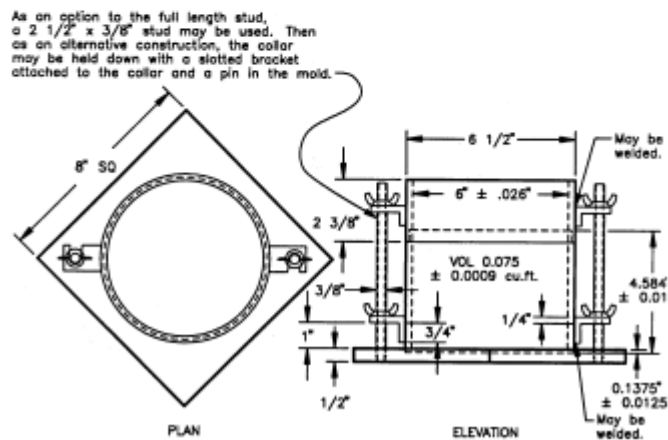
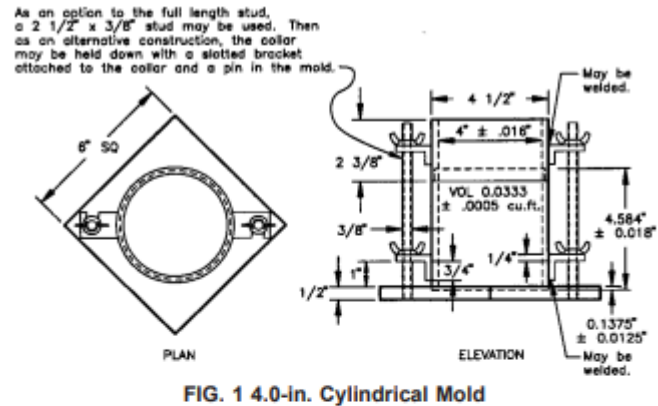
Arena gruesa	Entre 0.25 y 2.0 mm
Arena fina	Entre 0.05 y 0.25 mm
Limo (<i>silt</i>)	Entre 0.005 y 0.05 mm
Arcilla	Entre 0.001 y 0.005 mm
Arcilla coloidal	Menores a 0.001 mm

(Villalaz, 2004)

6. Ensayo de compactación proctor . Es una prueba la cual consiste en colocar tres capas iguales de suelo humedecido en un cilindro con un volumen de 1/30 de pie cúbico. A estas capas se les da 25 golpes con un pisón de 2.5kg de peso, cayendo desde una altura de 30 cm. Al aumentar la energía de compactación para un mismo suelo, este aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptima. Con el procedimiento realizado se puede determinar el peso volumétrico seco máximo alcanzado y el grado de compactación de la muestra. (Villalaz, 2004)

Debido a que la compactación fue siendo cada vez más pesada, se modificó este ensayo para simular de manera más realística la compactación del suelo. Este ensayo se conoce como Ensayo de Compactación Proctor Modificado. La única variación de este ensayo con el otro es el peso del martillo con el que se realizan los golpes. El tamaño de la caída del martillo es de 45.72 cm y su peso es de 4.54 kg. (Kaniraj, 1998)

Figura No. 10 Molde utilizado en el ensayo de compactación proctor



Norma ASMT D 698

7. Ensayo para peso unitario. También llamado ensayo del cono de arena. Consiste en utilizar arena tamizada anteriormente para formar un cono. Se excava un agujero de aproximadamente 15cm de profundidad y luego se agrega la arena del cono para llenar el agujero. El material que se agregó se seca y de esta manera se determinará la densidad del suelo. Mediante la diferencia del peso húmedo con el peso seco. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

También puede ser aplicado para agregados que no excedan de los 15 cm de tamaño nominal. Este ensayo es necesario para el diseño de una mezcla de concreto. El equipo necesario es de una balanza, una barrilla de apisonado de acero, un cubo de metal, y que la cantidad de muestra al horno del agregado no debe ser por lo menos un 125% la cantidad que se requiere para llenar el cubo metálico. Cabe destacar que el ensayo para arenas es diferente que para el de agregados. (Kett, 2010)

8. Ensayo para gravedad específica. Existen dos métodos para obtener la Gravedad Específica. Uno es utilizando un picnómetro de agua y el otro uno de gas. Para el picnómetro está designada la norma ASTM D5550 Gravedad Específica de los Sólidos del Suelo por Picnómetro de Gas. Por otro lado está designada la norma ASTM D854 Gravedad Específica de los Sólidos del Suelo por Picnómetro de Agua. El método del picnómetro de agua es utilizado para suelos con una gravedad específica baja, en cambio el método de picnómetro de gas es utilizado para suelos con gravedad específica mayor. (Germaine & Germaine, 2009)

9. Ensayo de abrasión. Este ensayo incluye ensayos de dos cuerpos y de tres cuerpos. En un ensayo de abrasión de dos cuerpos, uno de los miembros que se mueven es el miembro abrasivo. Este ensayo se puede llevar a cabo teniendo una de las superficies hecha de material abrasivo o en presencia de partículas abrasivas. (Bhushan, 1949)

Consiste en determinar la resistencia al desgaste de los agregados. Por medio de una máquina llamada Máquina de Los Ángeles, la cual es un tambor con pesos dentro de este. El tambor gira y hace que los pesos caigan simulando una carga vial. Se ingresan los agregados a la máquina y el resultado del ensayo es el porcentaje de la diferencia del peso de los agregados antes y después de ensayarlos dentro de la Máquina de Los Ángeles. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

10. **Ensayo de equivalente de arena.** Consiste en tomar del suelo los elementos que pasen por un tamiz de 5mm. Se coloca una cantidad conocida en una probeta transparente conteniendo agua. Se mezcla y se agita dicha mezcla. Luego se descartan los elementos arenosos más gruesos y se le agrega cloruro de calcio (Cl_2Ca) para que coagule la arcilla y los elementos finos. Se deja sedimentar la solución un tiempo fijo y por último se mide la altura de la arena depositada utilizando una varilla graduada. También se mide la arcilla que permanece en suspensión. (Sanz, 1975)

Este ensayo fue desarrollado por Francis Hveem en 1952. Originalmente se planteó como una prueba de campo rápida. Este sugería que un ensayo de equivalente de arena bajo indicaba que había arcilla o contenido de polvo en la muestra. Hoy en día se utiliza para determinar la relación de proporciones de plásticos finos o de material de arcilla en agregados finos. Las ventajas de este ensayo son su rápida ejecución y su poco equipo requerido para realizarlo. (Prowell, 2005)

11. **Ensayo de penetración.** Fue originalmente un ensayo desarrollado para medir la consistencia de materiales bituminosos. El material bituminoso que se estudió fue el asfalto y el alquitrán. A la hora de penetrar una muestra de asfalto o alquitrán, la distancia que la aguja recorre está expresado en décimas de milímetro. La muestra posee parámetros conocidos como temperatura, carga, tiempo, etc. (Lavin, P. 2003)

La norma AASHTO T 49 y ASTM D 5 detalla el procedimiento, materiales y equipo a utilizar para realizar el Ensayo de Penetración. También en estas se plantean criterios de precisión a la hora de evaluar un asfalto en diferentes condiciones (temperatura).

Figura No. 11 Equipo para ensayo de penetración



12. Ensayo de punto de ablandamiento. Este ensayo determina el punto de ablandamiento de productos derivados del petróleo, alquitrán, y otros materiales bituminosos. El rango de trabajo se encuentra entre 0 y 25%.

Las normas que rigen el procedimiento y especificaciones son la AASHTO T-53 Y ASTM D95. El procedimiento consiste en calentar una muestra de asfalto. Que esta no se pase más de 110°C, que no se caliente por más de una hora y no provocar la salida de burbujas en el material. Luego se vierte el material líquido en anillos amalgamados y se dejan enfriar. Por último en un laboratorio ventilado, con las guías para las esferas y con termómetros preparados, se obtienen datos para que de esta manera, por medio de cálculos, se obtenga el punto de ablandamiento del material.

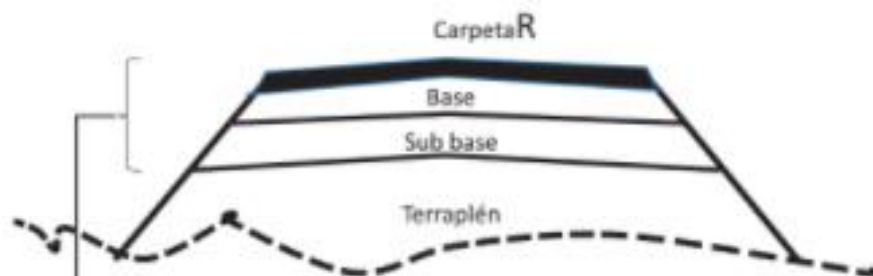
13. **Ensayo estabilidad y flujo marshall.** Este ensayo fue desarrollado por Bruce Marshall en 1948. El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos mejoró y agregaron ciertos avances al procedimiento del Ensayo Marshall, y desarrollarlo un criterio de diseño. El propósito del ensayo era medir la resistencia de una mezcla de asfalto compactada a un esfuerzo de compactación de laboratorio estándar. También es utilizado para optimizar el diseño del contenido de asfalto, y para medir el control de calidad de las mezclas de asfalto. El Flujo Marshall indica cuando una mezcla tiene un exceso de asfalto, es decir un exceso de ligante asfáltico. Las normas que rigen las especificaciones, equipo, requerimientos, información, datos, etc. Son la AASHTO T-245 y la ASTM D1559. (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015)

E. Pavimentos

1. **Pavimento flexible.** Compuesto generalmente por concreto asfáltico, capa de base (granular, triturada o estabilizada) y sub base (granular o triturada), repartiendo la carga a cada capa desde arriba hacia abajo. Se considera flexible por la poca resistencia a flexión y a la adaptación a deformaciones menores sin romperse.

La carga externa es transmitida al suelo con distribución lateral limitada. Las capas se dividen de cierta forma en que, las capas más fuertes ocupan un nivel mayor de cantidad de capas, y las débiles un nivel menor.

Figura No. 12 Capas de un pavimento flexible



(Espinosa, 2016)

2. **Pavimento rígido.** Este posee una alta resistencia a la flexión. Construido de hormigón, en donde se forma una losa rígida repartiendo la carga en un área grande. Se comporta como una viga, en donde se absorbe toda la carga. Estos pueden ser simple sin varillas en las juntas, simple con varillas en las juntas, o de concreto reforzado.

Pueden ser:

- Simple sin varillas en las juntas
- Simple con varillas en las juntas
- De concreto reforzado

La función de las juntas de contracción y expansión son de prevenir el cambio de volumen debido a un incremento de temperatura, evitando de esta manera que el concreto se agriete.

Beneficios del pavimento de concreto:

- Deterioro mínimo durante su vida útil
- Vida útil de 20 a 30 años
- Poco mantenimiento
- Rapidez de construcción
- Mejor drenaje superficial
- Disminución de costos de operación

Figura No. 13 Pavimento rígido



(Espinosa, 2016)

3. **Pavimento semirígido.** Pavimento flexible cuya base se le ha dado una rigidez alta por la adición de cemento o asfalto. (Juárez, 1998)

4. **Pavimento compuesto.** Posee varias capas, las cuales algunas son rígidas y otras son flexibles. Un ejemplo de este es un pavimento con una base de hormigón laminada junto con una capa de desgaste hecha de bitumen.

5. **Ligante.** Material utilizado con el propósito de sostener partículas sólidas juntas para formar una masa coherente.

6. **Ligante hidráulico.** Material cuya función es pegar. Al ser aplicado, fragua el medio en donde está. El endurecimiento del medio se lleva a cabo a una temperatura ambiente. Puede ser empleado en hormigones tixotrópicos para apresurar su endurecimiento. (Elías Castells, 2012)

Existen tres tipos de ligante hidráulico

- **Ligante hidráulico activo:** Actúa sin la adición de una sustancia activadora, como lo es la lima.
- **Ligante hidráulico latente:** Actúa con la adición de una sustancia activadora. Esta puede ser agua o lima.
- **Ligante hidráulico mezclador:** Es una mezcla entre el Ligante hidráulico activo y el latente. (Lea & Hewlett, 2006)

7. **Ligante asfáltico.** Sustancia aglomerante, formada por mezclas complejas y que posee buena adhesividad con los áridos. Este puede estar formado de alquitrán, betún, o una emulsión asfáltica. Son de color negro y tienden a ser muy viscosos.(Muncharaz Pou, 2013)

El bitumen se le conoce de diferentes nombres alrededor del mundo. En la mayoría de países de Europa, se le conoce como “bitumen” o “bitumen refinado”. En Estados Unidos es sinónimo del término “asfalto” o “cemento asfáltico”.

Para mezclas de asfalto, las características que las podrían definir son las siguientes:

- Propiedades Mecánicas y de Estabilidad
- Durabilidad
- Seguridad en su uso

(Huang & Di Benedetto, 2015)

8. **Estructura de una carretera.** Consiste básicamente en cuatro capas hechas de material de construcción, colocadas de abajo hacia arriba. Las capas son las siguientes:

a. **Sub base.** Ayuda a distribuir la carga

- Ayuda a drenar el sub suelo (Si se utiliza material drenante).
- Sirve como camino temporal para la construcción.

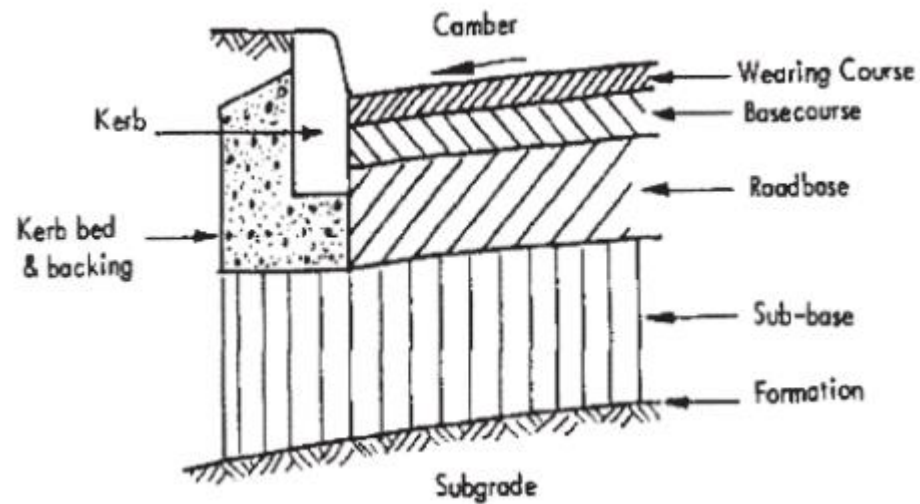
b. **Capa de rodadura.** Es la capa que se encarga de esparcir la carga principal a la que es sometida la carga.

c. **Capa base.** Soporta la Capa Superficial. También ayuda en proteger la carretera.

d. **Capa superficial.** Aporta una superficie antideslizante.

- Impermeabiliza el pavimento.
- Es la capa que recibe el contacto directo de las cargas de tráfico

Figura No. 14 Sección de una carretera



(Raina, 2009)

9. Capa de base de un pavimento. Es la capa ubicada debajo del pavimento. Su función es de fines resistentes. Absorbe mayoritariamente los esfuerzos verticales que afectan al pavimento. Si las cargas son pequeñas, la base puede estar formada por arenas y gravas. Si son cargas altas, se emplean materiales granulares tratados con ligante o aglomerante. ("Proyectos con Adoquín Cerámico (y II)", 2017)

VI. METODOLOGÍA

A. Se toma una muestra de material para base, cumpliendo con las especificaciones del Libro Azul o *Libro de Normativa para Carreteras y Puentes de Guatemala*.

B. Ejecución de ensayos:

Para la base:

Figura No. 15 Suelo a ensayar para la base



Elaboración propia

- Granulometría: Se utilizarán los tamices No. 4, No. 10, No. 20, No. 30, No. 40, No. 60, No. 100, No. 200. Esto según la norma ASTM D422.

Luego se ajustará el material para que esta se encuentre dentro de los límites de la curva teórica. También se hará la clasificación de qué tipo de base es, según su granulometría. La clasificación entrará en los límites de la norma AASHTO, la cual deberá ser A1 o A2.

Figura No. 16 Tamices a utilizar para el ensayo de granulometría



Elaboración propia

Figura No. 17 Ensayo de granulometría



Elaboración propia

Figura No. 18 Resultado del ensayo de granulometría



Elaboración propia

- Límites de atterberg: Se emplean especificaciones de la norma ASTM D 4318-84 para determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad. Se realiza una evaluación de las propiedades expansivas y de saturación del suelo. El índice plástico se encuentra mediante la diferencia entre el límite plástico y el límite líquido. Para una base, este no debe ser mayor a 3, ya que de esta manera la base no entra en especificación de la norma.

Figura No. 19 Equipo de ensayo de límites de consistencia



Elaboración propia

- Proctor: Se determinará el porcentaje de humedad óptimo para la compactación.

Figura No. 20 Molde del ensayo proctor



Elaboración propia

Figura No. 21 Ensayo proctor modificado



Elaboración propia

- CBR: Mediante este se encuentra la resistencia al corte utilizando el porcentaje de humedad óptima. También la expansión volumétrica al estar sumergido en agua. Norma ASTM D 1883-99.

Figura No. 22 Molde Utilizado para el ensayo CBR



Elaboración propia

Figura No. 23 Máquina del ensayo CBR



Elaboración propia

A los agregados:

Estos agregados ya fueron clasificados por la compañía Sigma, en el Campamento. Estos son provenientes de la CA-02 Oriente. Se cuenta con la ficha técnica de los ensayos realizados que se muestran a continuación.

Figura No. 24 Muestra de agregados a ensayar



Elaboración propia

- Caras fracturadas: Se realiza la medición de las partículas del agregado grueso en función de su morfología (su forma). Partículas planas y alargadas para cumplir con la especificación. Norma ASTM D 5821.

- Desintegración al sulfato de sodio: Se sumergen los agregados en una solución de sulfato de sodio o de magnesio para medir el porcentaje de desintegración. Norma ASTM C 88.
- Abrasión: Se utilizará la máquina de Los Ángeles para medir la resistencia al desgaste de los agregados gruesos. Norma ASTM C 131.
- Equivalente de arena: Se determina el porcentaje de arena que tiene la muestra para cumplir con las especificaciones de la Norma ASTM D 2419.

Figura No. 25 Manual del ensayo equivalente de arena



Elaboración propia

Figura No. 26 Probetas del ensayo equivalente de arena



Elaboración propia

Figura No. 27 Ensayo equivalente de arena



Elaboración propia

Una vez diseñada la base, se procede a realizar los siguientes ensayos al asfalto:

- Penetración: Se medirá qué tan blando o rígido es el ligante asfáltico. Norma ASTM D 5.
- Punto de ablandamiento: Se mide el punto en que el asfalto tiende a fluir. Encontrar la temperatura en la que pasa de un estado sólido a líquido. Norma ASTM D 95.

Luego se mezclarán la base con el asfalto para formar una mezcla asfáltica. A esta se le realizarán los siguientes ensayos:

Se modificará el asfalto a 150°C con hélices de modificación.

- Estabilidad y Flujo Marshall: Se realiza una correlación del módulo de elasticidad de la base.

Figura No. 28 Preparación de briqueta de asfalto y agregados



Elaboración propia

Figura No. 29 Peso de briqueta para ensayo estabilidad y flujo marshall



Elaboración propia

Figura No. 30 Briqueta puesta a prueba para ensayo estabilidad y flujo marshall



Elaboración propia

3. Se hace un diseño de pavimentos comparando el aporte estructural de una base convencional contra el aporte estructural de una base modificada, principalmente ante la fatiga revisando esfuerzos y deformaciones.
4. Se realiza el análisis de proyección de vida de una base modificada y una no modificada de una base de pavimento.

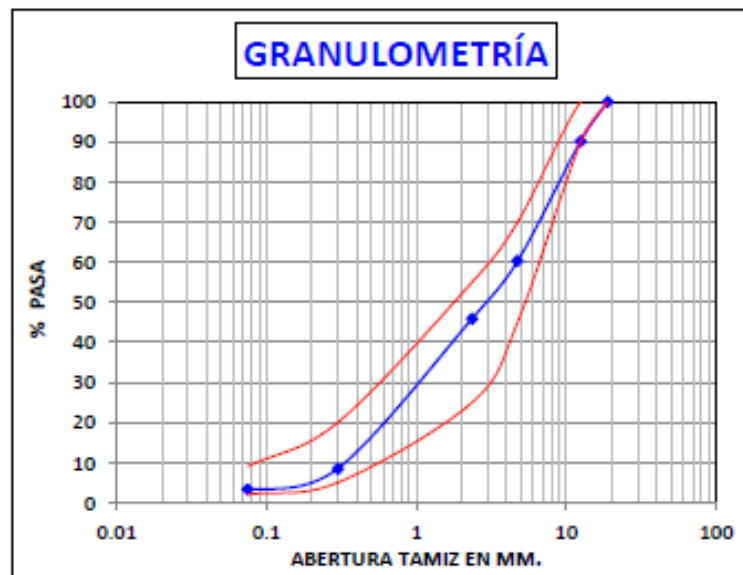
VII. RESULTADOS

A. Ensayo de granulometría

Cuadro No. 1 Granulometría integrada tipo C-2

<i>Tamiz</i>	<i>% Pasa</i>
3/4"	100.0
1/2"	90.2
No. 4	60.3
No. 8	45.9
No. 50	8.5
No. 200	3.2

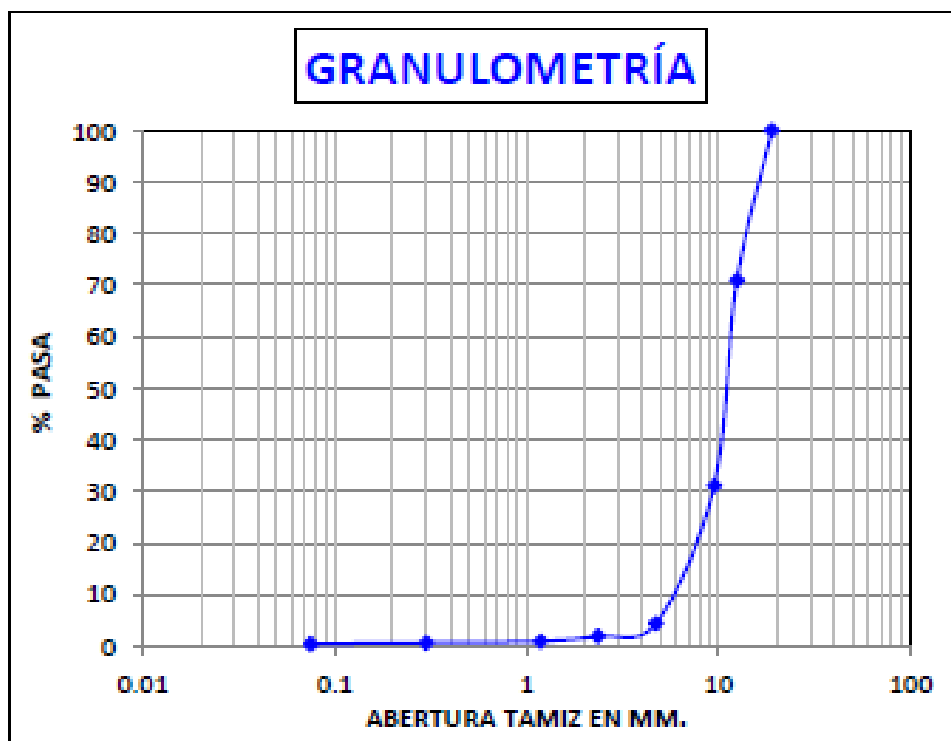
Figura No. 31 Curva granulométrica integrada tipo C-2



Cuadro No. 2 Granulometría de agregados ¾"

<i>Tamiz</i>	<i>% Pasa</i>
¾"	100.0
½"	71.0
⅜"	31.2
No. 4	4.5
No. 8	2.0
No. 16	1.0
No. 50	0.7
No. 200	0.5

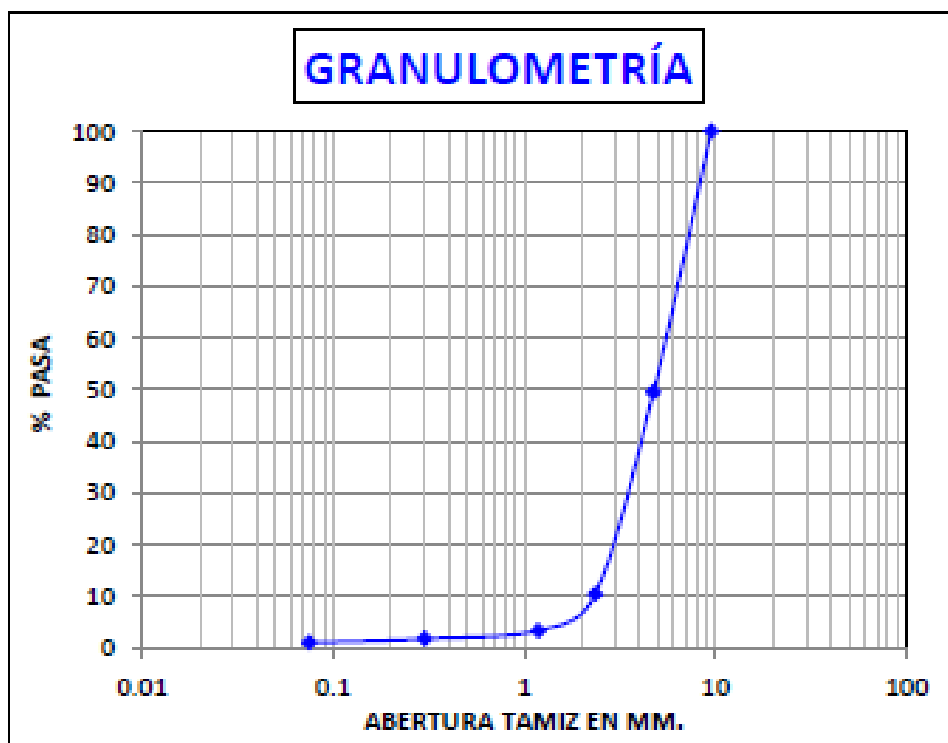
Figura No. 32 Curva granulométrica de agregados ¾"



Cuadro No. 3 Granulometría de agregados 3/8"

<i>Tamiz</i>	<i>% Pasa</i>
3/8"	100.0
No. 4	49.5
No. 8	10.4
No. 16	3.3
No. 50	1.7
No. 200	1.0

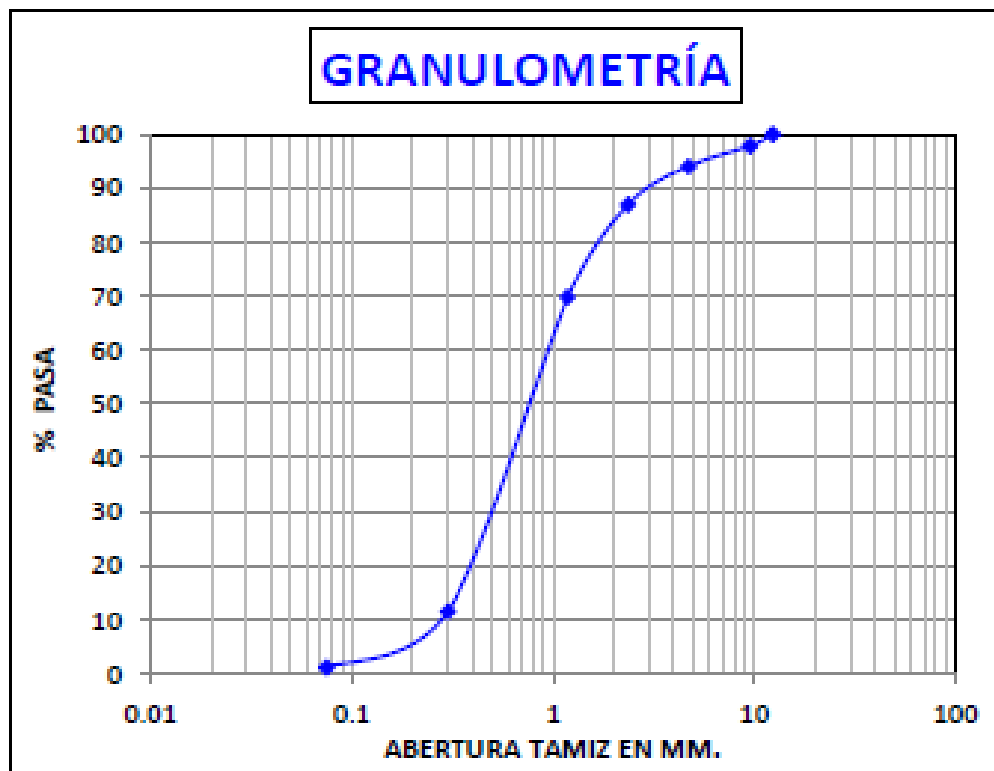
Figura No. 33 Curva granulométrica de agregados 3/8"



Cuadro No. 4 Granulometría de arena de río

<i>Tamiz</i>	<i>% Pasa</i>
1/2"	100.0
3/8"	97.9
No. 4	94.1
No. 8	86.9
No. 16	69.7
No. 50	11.5
No. 200	11.1

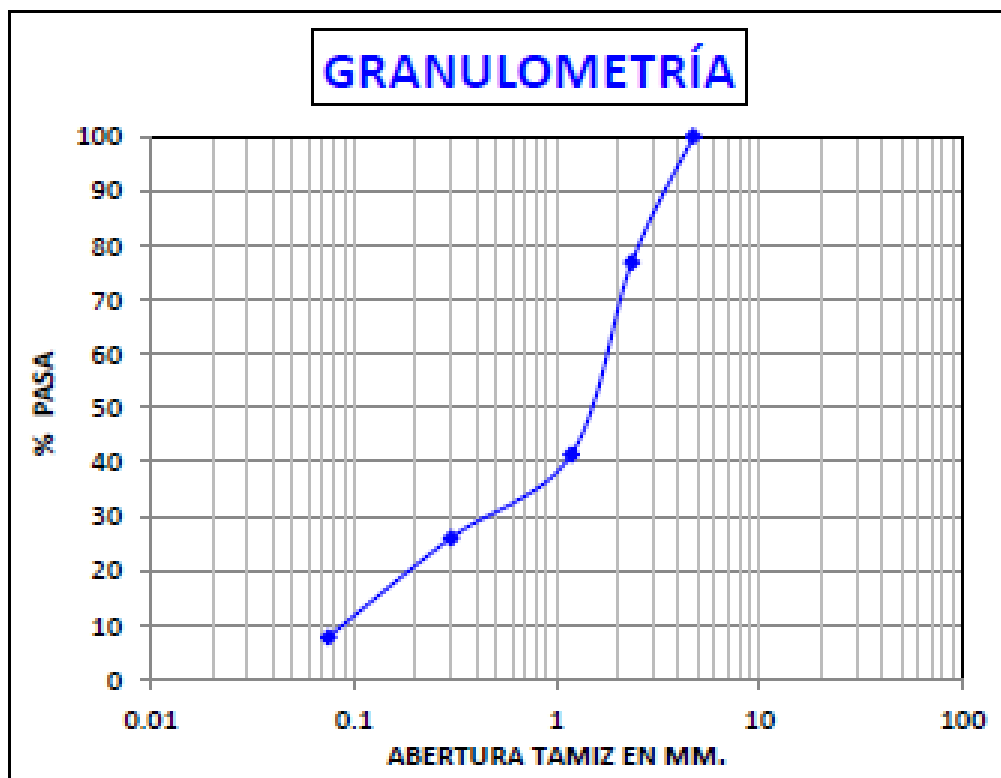
Figura No. 34 Curva granulométrica de arena de río



Cuadro No. 5 Granulometría de filler

<i>Tamiz</i>	<i>% Pasa</i>
No. 4	100.0
No. 8	76.9
No. 16	41.4
No. 50	26.0
No. 200	7.8

Figura No. 35 Curva granulométrica de filler



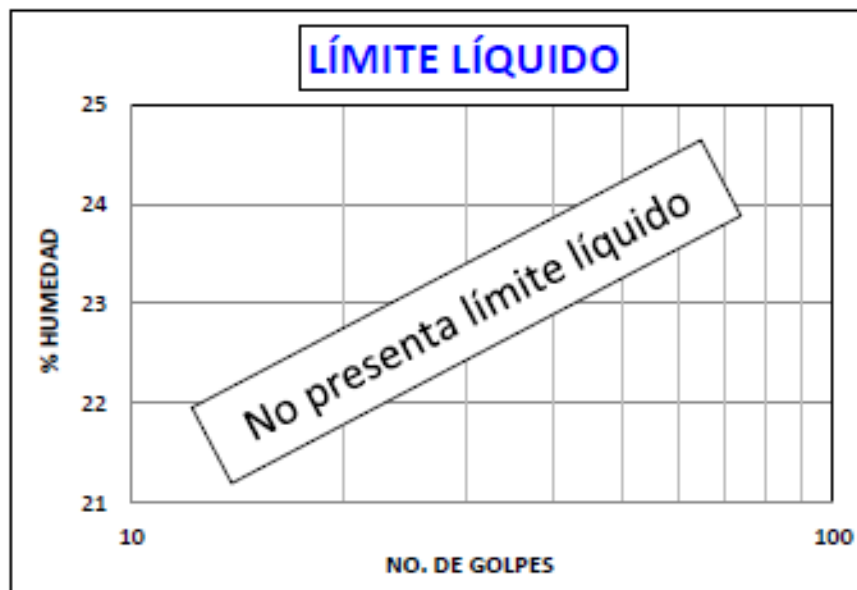
De los materiales muestreados se determinó que la base ideal para una capa base de pavimento consta de un 38% de grava, 20% de gravilla y 42% de base. En la Figura No. 32 Se muestran las curvas teóricas de aceptación de la norma y la curva granulométrica que se utilizaría en la mezcla a analizar. Esta curva entra entre los rangos de aceptación, por lo que dicha iba a tener un control de calidad aceptable. Para los agregados, se utilizó un total de 35% de agregados 3/4", 10% agregados 3/8", 20% de arena de río y 35% de material Filler (No. 4-0). La cantidad de los diferentes tipos de suelos iban a ser iguales para ambas mezclas, es decir, para la mezcla modificada y para la mezcla convencional.

B. Ensayo de límites de consistencia (Atterberg)

Cuadro No. 6 Límites de consistencia de granulometría integrada tipo C-2

LÍMITES DE CONSISTENCIA	
LÍMITE LIQUIDO:	N. L.
LÍMITE PLÁSTICO:	N. P.
ÍNDICE DE PLASTICIDAD:	N. P.

Figura No. 36 Curva de límites de consistencia de granulometría integrada tipo C-2



Ninguno de los agregados presenta límite líquido o límite plástico, por lo que el índice de plasticidad iba a ser igual a cero. La norma dicta que el índice plástico debe ser menor a 3. Dado que la Granulometría Integrada Tipo C-2 no presenta límite líquido, el material está por encima de la norma, teniendo un control de calidad bueno y aceptable.

C. Ensayo de peso unitario y gravedad específica

Cuadro No. 7 Peso unitario y gravedad específica de granulometría integrada tipo C-2

Peso unitario	97.9	lb/ft ³
Gravedad específica	2.556	lb/ft ³

Cuadro No. 8 Peso unitario y gravedad específica de agregado $\frac{3}{4}$ "

Peso unitario	98.3	lb/ft ³
Gravedad específica	2.52	lb/ft ³

Cuadro No. 9 Peso unitario y gravedad específica de agregado $\frac{3}{8}$ "

Peso unitario	96.1	lb/ft ³
Gravedad específica	2.54	lb/ft ³

Cuadro No. 10 Peso unitario y gravedad específica de arena de río

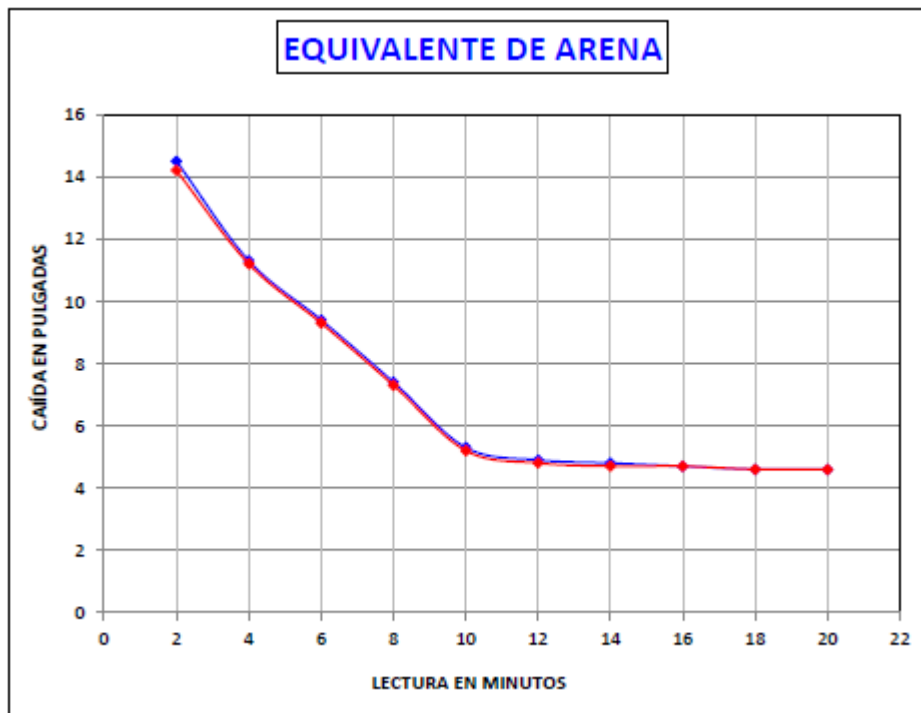
Peso unitario	87.2	lb/ft ³
Gravedad específica	2.52	lb/ft ³

Cuadro No. 11 Peso unitario y gravedad específica de filler

Peso unitario	96.2	lb/ft ³
Gravedad específica	2.58	lb/ft ³

D. Ensayo de equivalente de arena

Figura No. 37 Ensayo de equivalente de arena en granulometría integrada tipo C-2



Cuadro No. 12 Ensayo de equivalente de arena en granulometría integrada tipo C-2

PRUEBA	1	2	PROMEDIO % E. A.
ALTURA DE PIE	3.5	3.5	76.1
% EQUIVALENTE DE ARENA	76.1	76.1	

La arena en una estructura aporta resistencia al corte, por lo que una capa base debe poseer un mínimo porcentaje de arena en su estructura. El ensayo dio como resultado un 76.1% de cantidad de arena en la muestra, la Granulometría Integrada Tipo C-2 cuenta con una cantidad alta de arena, favoreciendo de esta manera en la aportación estructural.

E. Ensayo de desintegración al sulfato de sodio

Cuadro No. 13 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en agregados $\frac{3}{4}$ "

TAMIZ	% DE DESGASTE SIN CORRECCIÓN	%DE DESGASTE CON CORRECCIÓN
1/2" - 3/8"	0.4	0.28
No. 4	1.6	0.43
	2.0	0.71

Cuadro No. 14 Porcentaje de desgaste químico en agregados $\frac{3}{4}$ "

DESGASTE QUÍMICO
0.71 %

Cuadro No. 15 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en arena de río

TAMIZ	% DE DESGASTE SIN CORRECCIÓN	%DE DESGASTE CON CORRECCIÓN
No. 4	0.0	0.00
No. 8	3.4	0.79
No. 16	3.0	1.07
No. 30	6.2	0.94
No. 50	10.3	0.95
	22.9	3.75

Cuadro No. 16 Porcentaje de desgaste químico en arena de río

DESGASTE QUÍMICO
3.75 %

Cuadro No. 17 Ensayo de desintegración al sulfato de sodio en arena de río

TAMIZ	% DE DESGASTE SIN CORRECCIÓN	%DE DESGASTE CON CORRECCIÓN
No. 4	0.0	0.00
No. 8	3.4	0.79
No. 16	3.0	1.07
No. 30	6.2	0.94
No. 50	10.3	0.95
	22.9	3.75

Cuadro No. 18 Porcentaje de desgaste químico en arena de río

DESGASTE QUÍMICO
3.75 %

La norma dicta que el desgaste químico de un agregado al ser sometido a una solución salina debe ser menor al 12%. Como se puede observar en los cuadros de Resultados del Ensayo Desintegración al Sulfato de Sodio, el desgaste de los materiales muestreados no es cercano al 12%, por lo que estos entran en los rangos de aceptación de la norma. Cabe destacar que estos resultados son representados en cinco ciclos, es decir, los agregados fueron expuestos cinco veces a una solución salina.

F. Ensayo de abrasión (máquina de los ángeles)

Cuadro No. 19 Ensayo de abrasión en agregado 3/4"

MUESTRA	RETIENE TAMIZ	TIPO DE ABRASIÓN	PORCENTAJE DE ABRASIÓN
Agregado 3/4"	1/2" - 3/8"	"B"	31.5 %

Cuadro No. 20 Ensayo de abrasión en agregado 3/8"

MUESTRA	RETIENE TAMIZ	TIPO DE ABRASIÓN	PORCENTAJE DE ABRASIÓN
Agregado 3/8" - 0	No. 4 - No. 8	"C"	28.6 %

Este ensayo fue realizado únicamente en los agregados de tamaño grande y mediano. El porcentaje de abrasión es relativamente bajo para ambos tamaños, lo que quiere decir que los materiales muestreados presentan una alta resistencia al desgaste.

G. Ensayo de caras fracturadas

Cuadro No. 21 Resultado de caras fracturadas

% PARTÍCULAS CON 1 CARA FRACTURADA	100.0	> 90%
% PARTÍCULAS CON 2 CARAS FRACTURADAS	99.7	> 75%
% PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS	1.58	< 8%

Según la norma, el 90% de los agregados debe tener por lo menos una cara fracturada, el 75% dos caras fracturadas. Esto se estableció ya que el agregado, al tener caras fracturadas, genera mayor cohesión entre los demás materiales. La muestra de agregados que se estudió está por encima de la norma, teniendo un 100% de agregados con una cara fracturada y 99.8% de agregados con dos caras fracturadas. Es decir que los agregados de la muestra poseen una excelente calidad, y su desempeño será muy bueno.

H. Ensayo estabilidad y flujo marshall

Figura No. 38 Ensayo estabilidad marshall vs porcentaje de emulsión en capa base modificada

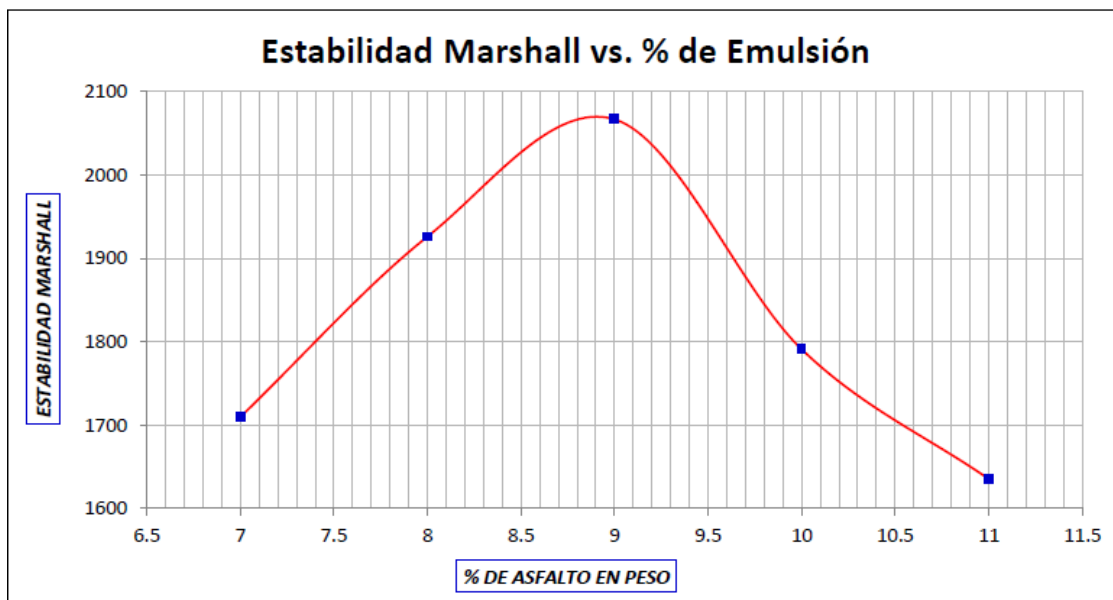


Figura No. 39 Ensayo fluencia vs porcentaje de emulsión en capa base modificada

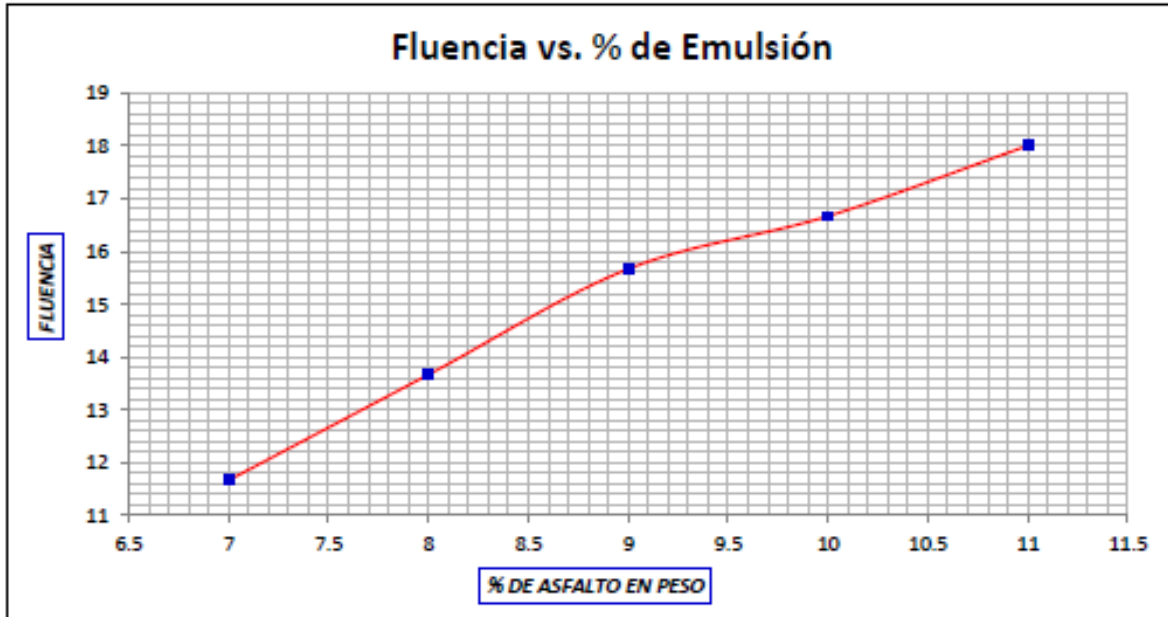


Figura No. 40 Ensayo estabilidad marshall vs porcentaje de emulsión en capa base convencional

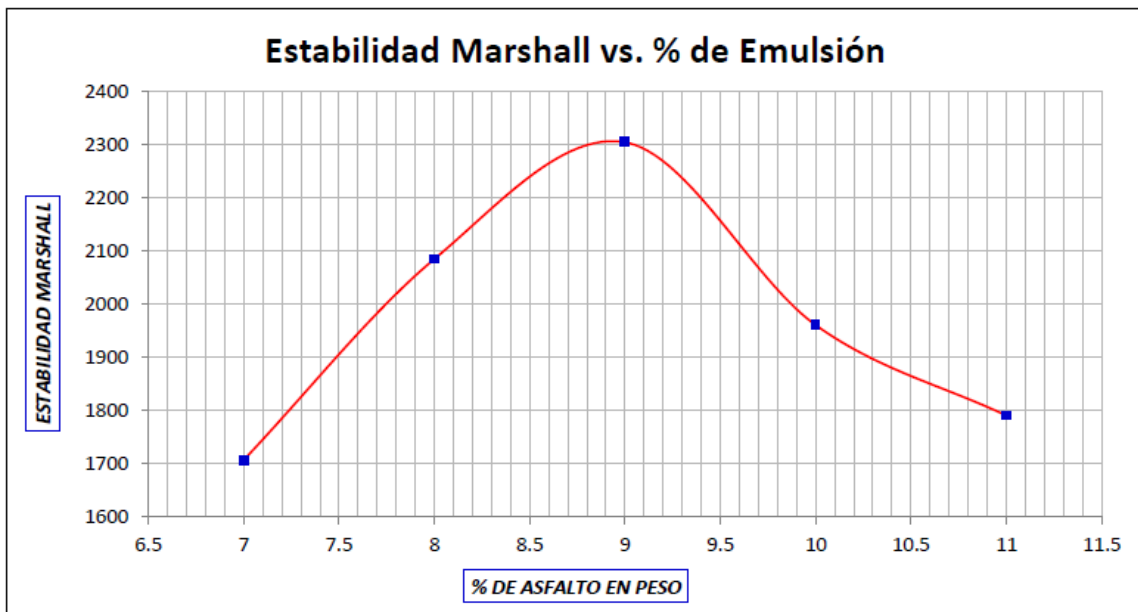
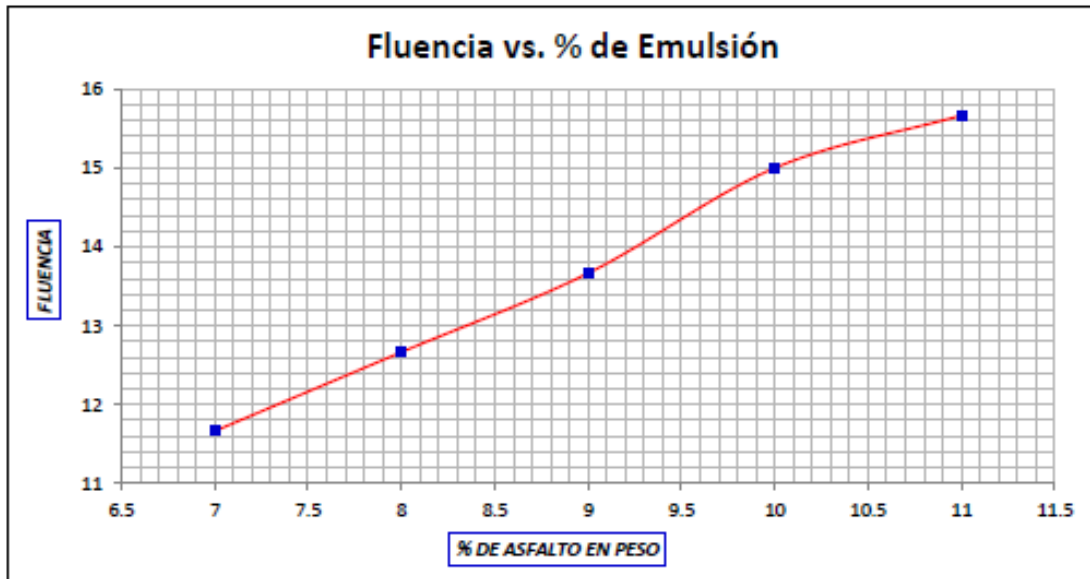


Figura No. 41 Ensayo fluencia vs porcentaje de emulsión en capa base convencional



En la gráfica de Ensayo Estabilidad Marshall vs porcentaje de Emulsión en Capa Base y Convencional, se utilizó el dato en donde este era el óptimo, es decir, en donde se producía el punto de inflexión. Sin embargo, se planteó utilizar datos de diseño, en donde la Estabilidad Marshall se reduciría.

VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se encontró el factor de corrección para la capa base con emulsión utilizando los resultados de la Estabilidad Marshall. A continuación se muestran los resultados de los factores para cada mezcla.

Cuadro No. 22 Resultado del factor para ensayo convencional

Ensayo convencional			
Estabilidad Marshall	1820	lbs	8095.76 N
a =	0.30		

Cuadro No. 23 Resultado del factor para ensayo modificado

Ensayo modificado			
Estabilidad Marshall	1885	lbs	8384.90 N
a =	0.32		

Luego se halló el número estructural (SN) utilizando coeficientes estándares para cada tipo de Base. Se le dio un espesor a cada capa y con base en esto se halló el número estructural que iba a tener dicha combinación de capas. Se utilizó un coeficiente de drenaje de 1 para la carpeta asfáltica, 0.9 para la base más emulsión y 0.7 para la sub base.

También se encontró el Número Estructural Requerido, mediante su respectiva ecuación. Se utilizó una Confiabilidad del 85%, ESAL de 4,200,000 en 5 años y 6,800,000 en 10 años (Número de ejes equivalentes de 18,000 lbs acumulados para el periodo de diseño), Δ PSI de 2.2 (Presión inicial 4.2 y Presión final 2) y el Módulo de Resiliencia de cada mezcla.

Cuadro No. 24 Número estructural para 5 y 10 años

SN Req (5 años)	4.78
SN Req (10 años)	5.11

Con el número estructural requerido, se realizaron varias corridas para encontrar el espesor óptimo de la capa base más emulsión, en donde el número estructural obtenido de la mezcla debía ser mayor o igual que el número estructural requerido.

Cuadro No. 25 Espesor requerido para un número estructural de 5 años del ensayo requerido

Ensayo Modificado				
	a	Espesor (in)	Coeficiente de drenaje	
Capa asfáltica	0.4	3.973	1	1.59
Capa base + Emulsión	0.32	8.66	0.9	2.49
Capa sub base	0.1	9.84	0.7	0.69
SN Total			4.78	

Cuadro No. 26 Espesor requerido para un número estructural de 5 años del ensayo requerido

Ensayo convencional				
	a	Espesor (in)	Coeficiente de drenaje	
Capa asfáltica	0.4	3.973	1	1.59
Capa base + Emulsión	0.30	9.45	0.9	2.55
Capa sub base	0.1	9.84	0.7	0.69
SN Total			4.83	

Como se puede observar, el espesor requerido en el ensayo modificado es de 8.66 pulgadas, lo que es equivalente a 22 centímetros. Por otro lado, en el ensayo convencional el espesor requerido es de 9.45 pulgadas, lo que es equivalente a 24 centímetros. La diferencia entre ambas mezclas es de 2 centímetros de espesor.

Para ejemplificar los beneficios de una capa base modificada contra una capa convencional, se planteó un ejemplo de 20 kilómetros de longitud para carriles, utilizando la diferencia de espesores entre ambas bases.

Cuadro No. 27 Datos de la base

Longitud de la carretera (m)	Longitud de dos carriles (m)	Diferencia de espesor (m)
20000.00	6.50	0.02

Cuadro No. 28 Volumen de la base

Volumen de base (m ³)
2600.00

El valor de la cantidad del volumen de la diferencia de grosor entre la capa base modificada y la capa base convencional es significativo. Al multiplicar ese valor por la densidad de la base estabilizada obtendríamos la cantidad de toneladas requeridas. Finalmente, multiplicando las toneladas por el costo de base por tonelada, obtendríamos la diferencia de costos de utilizar la capa base modificada. Se utilizó 2.54 kg/m³ como densidad de la base estabilizada.

Al valor del costo de carretera por tonelada se le dio un estimado de Q550.00. Este valor depende mucho del acarreo y de la estabilización de la base en campo.

A continuación se muestra en el Cuadro No. 29 el costo ahorrado utilizando un espesor de 2 centímetros en una base.

Cuadro No. 29 Costo de la base

Costo base (Q)	
Q	3,151,720.00

Ahora el mayor problema está en la producción u obtención de las fibras de carbono, la cual es costoso. Se han realizado diferentes estudios, como se muestran en la sección de Antecedentes. Actualmente el costo promedio de nano fibras de carbono se encuentra alrededor de 10 a 14 dólares el gramo. El alto valor se le da debido a que la obtención de estos no es de manera directa, es decir, tienen que pasar por un proceso químico en donde se separan las nano fibras de carbono de algún metal pesado. A la base estudiada en esta tesis se le modificó con un 3% de nano fibras de carbono, las cuales provenían de Colombia. Si se hace la relación del 3% en función del volumen, se obtendría a cantidad de nano fibras que se utilizaron. Para proyectos de estructuras de carreteras grandes, el valor del costo agregado de las nano fibras de carbono sería igual de grande.

Lo ideal y óptimo sería obtener las fibras de carbono mediante el método de reciclaje, de una forma fácil, barata y rápida. Entonces de esta manera aprovechar los materiales que se dan por desperdicios y generar un material óptimo para la construcción de la capa base, ahorrando así cantidades significativas para una empresa, y al mismo tiempo promoviendo el reciclaje de los materiales.

IX. CONCLUSIONES

- La incorporación de nano partículas de carbono a un ligante asfáltico mejora el desempeño y el aporte estructural de una capa de base estabilizada.
- Se caracterizaron los agregados mediante todos los ensayos propuestos. Los agregados que se utilizaron fueron un 35% de agregados 3/4", 10% agregados 3/8", 20% de arena de río y 35% de material Filler (No. 4-0). Para la capa base de pavimento se utilizó un 38% de grava, 20% de gravilla y 42% de base.
- Al aumentar el coeficiente estructural de la capa base con la modificación se optimiza económicamente el proyecto, principalmente porque se evita la colocación de espesores gruesos de carpeta asfáltica.
- La estabilización de las capas de bases en las estructuras de pavimento permite tener mejores propiedades de drenaje para evitar los cambios de volúmenes o asentamientos de la estructura.
- Mediante el uso de materiales clasificados como desechos se pueden obtener fibras de carbono, generando optimización económica y estructural a la hora de construir una carretera.
- La modificación con ligante asfáltico modificado con nano partículas de carbono permite proponer capas estructurales recicladas para reducir el espesor de colocación de carpeta nueva.
- La estabilización de la capa base estructural permite proyecciones de vida más extendidas y mejor disipación de la carga antes las nuevas exigencias. Así mismo se reduce la necesidad de recursos naturales.
- Para la correcta aplicación de un ligante asfáltico modificado con nano partículas de carbono debe de existir un diseño de mezcla y control de calidad de agregados exigente. Ya que los valores alcanzados por la modificación son muy sensibles a todos estos parámetros.

X. RECOMENDACIONES

A los estudios se les recomienda:

Para profundizar el tema expuesto en esta investigación se recomienda realizar ensayos de ahuellamiento y fatiga. Idealmente aplicando el método superpave, el cual es un método más estricto, meticuloso y con más ensayos a realizar. También se recomienda profundizar en análisis de ligante asfáltico en un reómetro de corte dinámico o como mínimo hacer la caracterización física (penetración, ductilidad, punto de ablandamiento) y se recomienda realizar un estudio sobre el comportamiento de la estructura de pavimento en la estabilización de sub bases. Por otro lado, se recomienda realizar un análisis de viscosidad, el cual es un método que se está utilizando en países del primer mundo, y realizar ensayos ante la recuperación elástica.

A los alumnos que desean continuar con la tesis:

Se recomienda utilizar métodos de reciclaje, como por ejemplo el de las llantas o papel, para la obtención de fibras de carbono. De esta manera se pueden disminuir los costos de manera significativa. También se recomienda profundizar el procedimiento de obtención de las nano partículas de carbono en las compañías de producción de caucho y papel. Por otro lado, se recomienda modificar el bitumen y no la emulsión, de esta manera obtener mayor información y otros resultados. Además se recomienda mejorar la base agregándole una combinación de nano fibras con otro material, como otro nano polímero.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Abadía, R. *et al.* (2015). Libro de Actas VIII Congreso Ibérico de Agroingeniería. Universidad Miguel Hernández de Elche
- Besednjak, A. (2005). *Materiales compuestos*. Barcelona: Edicions UPC.
- Blair, E. (2017). *Manual de Riesgos y Avenamiento* (1st ed.) Turrialba, Costa Rica
- Bhushan, B. (1949). *Principles and Applications of Tribology*. United States.
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., & Panas, I. (2017). *Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement*. *Harvard.edu*. Retrieved 16 August 2017, from <http://adsabs.harvard.edu/abs/2004CPL...392..242B>
- Caballero, M. (2010). *El terreno*. [Place of publication not identified]: Edicions Upc.
- Callister, W. (2005). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona [etc.]: Reverté.
- Cordero, T., Rodríguez, J., Bedia, J., Rodríguez, J. (2007). Preparación de materiales de carbono a partir de lignina. *Óptica Pura y Aplicada*
- Chung, D. (2016). *Carbon Composites*. Saint Louis: Elsevier Science.
- Dal-Ré Tenreiro, R. (2014). *Caminos rurales*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Desconocido. (2007). *Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2008-2011*. (2007). [Madrid].
- Duda, W., & Sarabia González, A. (2013). *Manual tecnológico del cemento*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.

- Elías Castells, X. (2012). *Tratamiento y valorización energética de residuos*.
- Espinosa, J. (2016). *Las vías de comunicación: Fundamentos Basicos y Guia en la Construcción de Carretera* (1st ed.). Santo Domingo, República Dominicana: Guarrién Reyes.
- Fredlund, D., & Rahardjo, H. (2007). *Soil mechanics for unsaturated soils*. Norwich, NY: Knovel.
- Fink, D., Beaty, H., & Carroll, J. (1984). *Manual práctico de electricidad para ingenieros*. Barcelona [etc]: Reverté.
- Fuentes, T., Vázquez, C., & Vázquez, K. (2016). Incorporación de nanomateriales en el concreto fotocatalítico para la reducción de NOX y CO2. *Revista De Energía Física Y Química*, (Vol. 3 No. 8 50-56), 50. Retrieved from http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Energia_Quimica_y_Fisica/vol3num8/Revista_Energia_Quimica_Fisica_V3_N8_6.pdf
- Germaine, J., & Germaine, A. (2009). *Geotechnical laboratory measurements for engineers*. Hoboken, N.J.: John Wiley
- Gorisse, F., & Herrero Núñez, E. (1981). *Ensayos y control de los hormigones*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados.
- Huang, S., & Di Benedetto, H. (2015). *Advances in asphalt materials*. Oxford: Woodhead Publishing.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (1998). *Mecánica de suelos*. México D.F.: Limusa.
- Kalpakjian, S., Schmid, S., & Espinoza Limón Jaime. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, D.F.: Pearson Educacion.
- Kaniraj, S. (1998). *Soil Mechanics Found in Engineering Design*. New Delhi.

Kett, I. (2010). *Engineered concrete*. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis.

Lea, F., & Hewlett, P. (2006). *Lea's chemistry of cement and concrete*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinmann.

Lavin, P. (2003). *Asphalt Pavements*. London: Spon Press.

Leiva, F., Aguiar, J., Villegas, R., Salazar, J., & Loría, G. (2014). Nano-materiales en el desempeño del Asfalto. 30 de Agosto de 2017, de LanammeUCR Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/xmlui/bitstream/handle/50625112500/570/2014%20Nano-materiales%20en%20el%20desempe%C3%B1o%20del%20Asfalto.pdf?sequence=1>

Madrid: Díaz de Santos. Muncharaz Pou, M. (2013). *Proyecto y diseño de áreas verdes*. Madrid: Mundi-Prensa.

Mañá Reixach, F., & Genescá, G. (2003). *La obra gruesa*. Barcelona: Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya.

Mc Cormac, J. (2011). *Diseño de concreto reforzado*. [Place of publication not identified]: Alfaomega Grupo Editor

Nawy, E. (1997). *Concrete construction engineering handbook*. Boca Raton, FL: CRC.

Páez, A. (1986). *Hormigón Armado* (1st ed). Barcelona: Reverté

Poole Jr, C. & Owens, F. (2003). *Introducción a la Nanotecnología* (1st ed). Barcelona, España: Editorial Reverté

Prowell, B. (2005). *Aggregate properties and the performance of Superpave-designed hot mix asphalt*.

Proyectos con Adoquin Cerámico (y II). (2017). *Arte Y Cemento*, (2034), 53-56.
Obtenido de <https://books.google.com.gt/books?id=XQZbYJU8vzMC&pg=PT55&dq=ensayo+CBR+capacidad+de+soporte+de+una+explanada&hl=en&sa=X&ve>

Raina, V. (2009). *Raina'S Field Manual For Highway & Bridge Engineers* (3rd ed.). London: SPD.

Ramsden, J. (2017). *Nanotechnology: An Introduction* (2nd ed.). London: ELSEVIER.

Ritter, H. (1966). *Introducción a la química : tratado moderno para la enseñanza en universidades y escuelas técnicas superiores*. Barcelona [etc.]: Reverté.

Rodríguez, E. (2016). Uso de polvo de caucho de llantas en pavimentos asfálticos. *Boletín Técnico PITRA-LanammeUCR. Volumen 7 No. 4*.

Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. (2015). *Pavimentos*. Bogotá, D.C.: Ecoe Ediciones.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá: Bhandar Editores

Sanz, J. (1975). *Mecánica de Suelos* (1st ed) Barcelona, España: Editores Técnicos Asociados S.A.

Serena Domingo, P. (2009). *Nanociencia y nanotecnología*. Madrid: D - Fundación General de la Universidad Autónoma de Madrid.

Stewart, B., Howell, T., & Trimble, S. (2011). *Encyclopedia of water science*. New York: Taylor & Francis.

Takeuchi, N. (2009). *Nanociencia y nanotecnología* (1st ed.). México: Fondo de Cultura Económica.

Villalaz, C. (2004). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (5ta Ed). México: Limusa

Villegas, R., Aguiar, J., Vega, J., Leiva, F., Loría, L., Salazar, J., Porras, M., Vargas, A. (2013). La Nanotecnología en las Carreteras, una Posibilidad Real: Experiencia en Costa Rica. 30 de Agosto de 2017, de LanammeUCR Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr/banco-de-informacion-digital-on-line/07-02-13/2013/AMAAC-2013.pdf>

Villegas, R., Loría, L., Aguiar, J., Corrales, J., Fernandez, W., Reyes, F. (2012). METODOS AVANZADOS DE ANALISIS DE CIENCIA DE LOS MATERIALES Y NANOMATERIALES UTILIZADOS EN LA MODIFICACION DE ASFALTOS. 30 de Agosto de 2017, de LanammeUCR Sitio web: https://www.researchgate.net/profile/Wilmar_Fernandez-Gomez/publication/290194419_METODOS_AVANZADOS_DE_ANALISIS_DE_CIENCIA_DE_LOS_MATERIALES_Y_NANOMATERIALES_UTILIZADOS_EN_LA_MODIFICACION_DE_ASFALTOS/links/569560da08aeab58a9a4e566/METODOS-AVANZADOS-DE-ANALISIS-DE-CIENCIA-DE-LOS-MATERIALES-Y-NANOMATERIALES-UTILIZADOS-EN-LA-MODIFICACION-DE-ASFALTOS.pdf