



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**APORTE ESTRUCTURAL DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON  
INCLUSIÓN DE PLÁSTICO PET POR VÍA SECA A ESTRUCTURAS DE  
PAVIMENTO FLEXIBLE PARA VÍAS DE BAJO TRÁFICO SEGÚN  
ESPECIFICACIONES INVIAS**

**GERALDYN QUINTERO SERRATO  
EDWIN ANDRÉS BOHÓRQUEZ SOLER**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**APORTE ESTRUCTURAL DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON  
INCLUSIÓN DE PLÁSTICO PET POR VÍA SECA A ESTRUCTURAS DE  
PAVIMENTO FLEXIBLE PARA VÍAS DE BAJO TRÁFICO SEGÚN  
ESPECIFICACIONES INVIAS**

**GERALDYN QUINTERO SERRATO  
CÓDIGO 506785  
EDWIN ANDRÉS BOHÓRQUEZ SOLER  
CÓDIGO 507112**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**DIRECTOR:  
MARIO ALEXANDER CASTAÑEDA LÓPEZ  
MSC. INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C., DICIEMBRE DE 2020**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

## TABLA DE CONTENIDO

ABREVIATURAS	12
INTRODUCCIÓN	13
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	14
2.1 ANTECEDENTES	14
2.2 JUSTIFICACIÓN	16
PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	17
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	17
OBJETIVOS	18
4.1 GENERAL	18
4.2 ESPECIFICOS	18
ALCANCES Y LIMITACIONES	19
5.1 ALCANCE DEL PROYECTO	19
5.2 LIMITANTES	19
ESTADO DEL ARTE	20
MARCO TEÓRICO	25
7.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES	25
7.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS	25
7.2.1 Propiedades de las mezclas asfálticas.	26
7.2.2 Concreto Asfáltico.	28
7.3 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)	28
7.3.1 Características y propiedades.	29
7.3.2 Clasificación del Tereftalato de Polietileno (PET).	30
7.3.4 Proceso de producción del PET.	31
7.3.5 Realidad actual del PET.	33
7.4 MÓDULO RESILIENTE	36
7.5 PRINCIPALES DEFECTOS EN REVESTIMIENTOS ASFÁLTICOS	39
7.5.1 Agrietamiento por Fatiga.	39

7.5.2 Agrietamiento por Temperatura.	40
7.5.3 Ahuellamiento Subrasante.	41
METODOLOGÍA	42
RESULTADOS	44
ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
MODELACIÓN PAVIMENTO	51
11.1 PAVIMENTO FLEXIBLE SEGÚN PARÁMETROS INVIAS	51
11.2 PAVIMENTO FLEXIBLE CON INCLUSIÓN DE PLÁSTICO TIPO PET	61
11.3 EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE	64
11.4 EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN - CARPETA ASFÁLTICA	68
11.5 CARTILLA ESTRUCTURAS EQUIVALENTES	72
CONCLUSIONES	75
ANEXOS	77
BIBLIOGRAFÍA	80

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	26
TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS SEGÚN SU USO	30
TABLA 3. SISTEMA DE CÓDIGOS DE LOS PRINCIPALES PLÁSTICOS	31
TABLA 4. TABLA CONSIGNACIÓN DATOS INVESTIGACIÓN	44
TABLA 5. TABLA CONSIGNACIÓN DATOS MODELACIÓN	55
TABLA 6. DATOS ESTUDIO 6.	61
TABLA 7. MODELACIÓN 0% Y 5% DE PET	62
TABLA 8. MODELACIÓN 10% Y 15% DE PET	63
TABLA 9. MODELACIÓN 20 % Y 25% DE PET	63
TABLA 10. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 0% DE PET	65
TABLA 11. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 5% DE PET	65
TABLA 12. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 10% DE PET	66
TABLA 13. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 15% DE PET	66
TABLA 14. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 20% DE PET	67
TABLA 15. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 25% DE PET	67
TABLA 16. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 0% DE PET	69
TABLA 17. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 5% DE PET	69
TABLA 18. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 10% DE PET	70

TABLA 19. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 15% DE PET	70
TABLA 20. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 20% DE PET	71
TABLA 21. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 25% DE PET	71

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. PARTÍCULAS DE PET TRITURADO	23
FIGURA 2. PET TRITURADO 0.5, 1 Y 2%.	24
FIGURA 3. REACCIÓN QUÍMICA DEL PET.	29
FIGURA 4. PRODUCCIÓN DE PET	32
FIGURA 5. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PLÁSTICO DE 1950 A 2014	33
FIGURA 6. UTILIZACIÓN DEL PLÁSTICO	34
FIGURA 7. CONSUMO GLOBAL DE PLÁSTICO	35
FIGURA 8. DISPOSICIÓN FINAL DEL PLÁSTICO PET	35
FIGURA 9. DATOS DE RECICLAJE PET EN COLOMBIA	36
FIGURA 10. VARIACIÓN TÍPICA DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL RESILIENTE EN UN PAVIMENTO CON CARPETA ASFÁLTICA	37
FIGURA 11. MECANISMO DE DEFORMACIÓN	38
FIGURA 12. AGRIETAMIENTO POR FATIGA	40
FIGURA 13. AGRIETAMIENTO POR TEMPERATURA	41
FIGURA 14. AHUELLAMIENTO SUBRASANTE	41
FIGURA 15. FLUJOGRAMA DE METODOLOGÍA	43
FIGURA 16. ALTERNATIVA ESTRUCTURAL ESTRUCTURA TIPO 5	51
FIGURA 17. TABLA 5.1 COEFICIENTES ESTRUCTURALES	52
FIGURA 18. TABLA 4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA ESTRUCTURA	54
FIGURA 19. ESPESOR MÍNIMO PARA CARPETA ASFÁLTICA ESTABLECIDO POR EL MÉTODO AASHTO-93 EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE TRÁFICO.	55
FIGURA 20. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%	56
FIGURA 21. MODELACIÓN PITRA PAVE - CARGAS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%	56
FIGURA 22. MODELACIÓN PITRA PAVE - PUNTOS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%	57
FIGURA 23. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%	57
FIGURA 24. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 3%	58



FIGURA 25. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 3%	58
FIGURA 26. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 5%	59
FIGURA 27. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 5%	59
FIGURA 28. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 10%	60
FIGURA 29. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 10%	60
FIGURA 30. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CILINDRO CON PET CBR 10%	62
FIGURA 31. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 5% DE PLÁSTICO PET	72
FIGURA 32. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 10% DE PLÁSTICO PET	72
FIGURA 33. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 15% DE PLÁSTICO PET	73
FIGURA 34. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 20% DE PLÁSTICO PET	73
FIGURA 35. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 25% DE PLÁSTICO PET	74

## LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1. DENSIDAD BULK.	46
GRÁFICA 2. ESTABILIDAD MARSHALL	47
GRÁFICA 3. FLUJO MARSHALL	48
GRÁFICA 4. VACÍOS CON AIRE	48
GRÁFICA 5. VACÍOS CON ASFALTO	49
GRÁFICA 6. MÓDULO RESILIENTE	50
GRÁFICA 7. ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE	63
GRÁFICA 8. DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA	64
GRÁFICA 9. ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA A PARTIR DE ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE	68

**PERIODO:** 2020 III

**PROGRAMA ACADÉMICO:** Ingeniería Civil

**ESTUDIANTE:** Geraldyn Quintero Serrato código: 506785

**ESTUDIANTE:** Edwin Andrés Bohórquez Soler código: 507112

**DIRECTOR:** Mario Alexander Castañeda López

**ALTERNATIVA:** Trabajo de investigación.

## ABREVIATURAS

<b>ASTM:</b>	American Society for Testing and Materials
<b>BG:</b>	Base Granular
<b>CA:</b>	Concreto Asfáltico
<b>CBR:</b>	California Bearing Ratio – Relación de Soporte de California
<b>CEVE:</b>	Centro experimental de la vivienda económica
<b>CPE:</b>	Capacidad Portante Equivalente
<b>Eco:</b>	Ecológico
<b>IDU:</b>	Instituto de Desarrollo Urbano
<b>K:</b>	Módulo de reacción de la Subrasante
<b>Kg/cm<sup>2</sup>:</b>	Kilogramo sobre centímetro cuadrado
<b>Kgf:</b>	Kilogramo Fuerza
<b>m:</b>	Metro, equivalente a 100 cm o 3.28 pies.
<b>mm:</b>	Milímetros, equivalente a 0.001 m
<b>MAM:</b>	Mezcla de alto modulo.
<b>MPa:</b>	MegaPascal.
<b>Mr:</b>	Módulo de rotura.
<b>MR:</b>	Módulo Resiliente.
<b>NEE:</b>	Número de Ejes Equivalentes (Eje estándar de 8.2 Ton)
<b>NTC:</b>	Norma Técnica Colombiana
<b>PET:</b>	Tereftalato de polietileno
<b>Tec:</b>	Tecnología.
<b>SBG:</b>	Subbase Granular
<b>MDC:</b>	Mezcla Densa en Caliente
<b>VFA:</b>	Vacíos Llenos de Asfalto
<b>VMA:</b>	Vacíos en el Agregado Mineral
<b>DRS:</b>	Suelos y Pavimentos (Demoliciones)
<b>RV:</b>	Revestimientos y trasdosados (Vidrios)

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo recopila una variedad de estudios relacionados con las mezclas densas en caliente (MDC) con inclusión de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET) mediante vía seca para la elaboración de mezclas asfálticas, con el ánimo de obtener parámetros de diseño que permitan cuantificar la variación de su aporte estructural, previa a una evaluación mecánica de la mezcla que dan cuenta de las variaciones físicas y mecánicas, particularmente en su comportamiento resiliente, que permita evaluar su efecto en termino de espesores de la carpeta asfáltica frente a las mezclas densas en caliente convencionales, rigiéndose en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

El objetivo de este documento se basa en efectuar un análisis comparativo de un pavimento flexible de estructuras convencionales respecto a estructuras con mezclas asfálticas incorporando el plástico tipo PET, sobre una estructura de pavimento planteada a partir de los módulos resilientes encontrados en las investigaciones ya existentes y así mismo según la guía de diseño de pavimentos flexibles para bajo tráfico del INVIAS; en consecuencia, la investigación evaluará las características de calidad del material basados en las especificaciones del Instituto Nacional de Vías y bases de datos, adaptándolas para ser usadas con plástico tipo PET, posteriormente realizar el análisis de datos obtenidos, y así poder evaluar el aporte estructural de las mezclas asfálticas en caliente con inclusión de PET.

Este documento consta de una compilación de investigaciones existentes basadas en los diseños de mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET, la caracterización y el uso de los mismos; acompañado de una metodología que explicará el proceso y resultados del proyecto el cual ira enfocado al uso y aporte estructural de mezclas asfálticas en caliente con inclusión de plástico PET.

La metodología utilizada para llevar a cabo este proyecto contempla inicialmente la realización de una investigación exhaustiva con base a estudios ya ejecutados, fundamentados en la mezcla asfáltica con inclusión de plástico, los cuales permitan determinar y comparar las propiedades mecánicas establecidas en las especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y espacio público del INVIAS; junto con un análisis de comportamiento que determine los valores para el uso y posterior modelamiento del pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET.

## ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

### 2.1 ANTECEDENTES

La construcción y diseño de vías es uno de los sectores que genera mayor impacto al medio ambiente, y considerablemente tiene influencia con el desarrollo de la economía puesto que involucra gran cantidad de recursos, lo que lleva a que en la actualidad se combine con iniciativas que buscan reducir los efectos negativos en el entorno.

La economía colombiana frente a la producción de plástico está relacionada con varios sectores de la industria como lo son el agro, la construcción, incluso los alimentos; según Acoplasticos, una asociación colombiana que representa a las empresas de las cadenas productivas del plástico, en el año 2013 la industria del plástico vendió cerca de 3.5 millones de dólares superando la producción de plástico en más de 1 tonelada por año; en donde cerca del 74% de las botellas de plástico PET en el país terminan en los centros de acopio sanitarios y el 26% se recicla (Suárez Zarta, 2016).

Debido a lo anteriormente mencionado, se han practicado algunos estudios con el fin de optar por la recolección y tratamiento de plástico, logrando por este medio reutilizar el material para distintas finalidades.

En el marco de la sostenibilidad se puede comentar sobre grandes esfuerzos que se han realizado en cuanto a la incorporación de subproductos industriales, como el PET, obteniendo resultados satisfactorios a nivel técnico y económico. El polietileno de tereftalato, es un material modificador en las mezclas asfálticas. Este material es comúnmente usado para envase de bebidas y producciones textiles. En Colombia, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se producen alrededor de 84.000 Ton por año, de la que se recicla únicamente el 26% lo que convierte este material en un residuo bastante crítico (Ministerio de Ambiente, 2016). En el área de diseño de pavimentos, el PET es un residuo o material con poca investigación y el cual es prácticamente nuevo en relación a su utilización como modificador de propiedades mecánicas.

Dentro de los estudios realizados acerca de la implementación del Tereftalato de Polietileno (PET) en las mezclas asfálticas, el desempeño de las mezclas con adición de residuos de PET a la mezcla tiene un efecto positivo significativo en las propiedades que podría mejorar la resistencia de la mezcla a la deformación permanente, aumentar la rigidez de la mezcla, proporcionar un menor drenaje de aglutinante y promover la reutilización y el reciclaje de residuos materiales de una manera más ecológica y económica (Camacho, Gómez & López, 2019).

La implementación de otros materiales e incluso con el remplazo en algunos porcentajes de los materiales convencionales como es el caso de la producción de mezclas asfálticas con

inclusión de plástico PET que evalúa la viabilidad de diseño de mezcla asfáltica modificada con 1% de PET, en donde, la adherencia que presenta la mezcla asfáltica, es del 96%, porcentaje que cumple con el que recomienda la norma para una mezcla tipo MDC-19 que debe ser mayor del 80%. (Camacho, Gómez & López, 2019).

Por lo anterior, la inclusión de nuevos materiales para la producción de mezclas asfálticas fue dando un nuevo giro hacia la reutilización de desechos comunes cuya disposición final es inadecuada, y los cuales al ser combinados con otro elemento o material pueden generar nuevos productos.

A nivel mundial existen numerosos estudios de mezclas asfálticas generados con materiales reciclados, como lo son las mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados especificadas en la sección 560 – 11 de Instituto de desarrollo urbano IDU y el Instituto Nacional de Vías INVIAS

Se tienen diferentes procesos para agregar este material a la mezcla, en este caso se realizará por vía seca y este proceso consiste en triturar los residuos del polímero una vez se tengan las partículas granulares del tamaño deseado con este plástico. De esa forma se genera material con variedad de tamaños para la creación de la mezcla (Sojobi, Nwobodo, & Aladegboye, 2016). Ese documento analizó el caso en el que se reemplaza un porcentaje de finos de origen natural por finos obtenidos de la trituración del polímero. De los resultados obtenidos se puede deducir que la presencia del PET reciclado de botellas genera un impacto positivo, causando que el valor del índice de penetración sea menor en consecuencia con el aumento en el porcentaje de la presencia de este material.

Se encuentra también otro estudio, en el que el PET reciclado no se utiliza para modificar el asfalto y sus propiedades, sino que se utiliza como material granular para la elaboración de ladrillos. Esos ladrillos consisten en una mezcla entre suelo natural principalmente arenas y material triturado de PET, para conseguir un determinado nivel de cohesión los cuales son calentados a 160 °C (Khoury, 2012).

De la mayoría de los casos estudiados en el presente trabajo, se evidencio que el uso de PET en los pavimentos es relativamente reciente, donde la función que cumple es principalmente como un agregado adicional en la mezcla asfáltica mediante proceso en seco, el cual busca mejorar la resistencia y el comportamiento del asfalto y por tanto conllevan a mejorar las condiciones de servicio. Sin embargo, no se encuentran referencias que mencionen este material como materia prima en una utilización del 100% en capas completas de pavimento, ni rodadura.

## 2.2 JUSTIFICACIÓN

Los pavimentos flexibles son considerados dentro de las alternativas de pavimentación como los más utilizados en cuanto a su reparación y mantenimiento debido a su bajo costo, comparados con los pavimentos rígidos, estas han sido objeto de investigación debido a sus múltiples opciones de modificación que permiten mejorar sus características mecánicas de manera que puedan ser una alternativa a la inclusión de materiales reciclados.

En el país, la implementación de pavimentos flexibles esta mayormente marcada para el ámbito vehicular, tanto para bajos volúmenes de tránsito como para altos, sin embargo, la inclusión de materiales reutilizables para este tipo de pavimentos no ha tenido una difusión adecuada, además de requerir de una reglamentación acorde con las políticas distritales.

Como una necesidad que da parte a la concientización del uso del PET, pero más a la reutilización de este material y con el fin de crear nuevos productos bajo una reglamentación desde la recolección, el tratamiento y producción para diferentes tipos de productos; se opta como aplicación de mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET el cual sugiere desde una característica de duración, la relación del aporte estructural basado en sus propiedades mecánicas y la implementación de estas en un pavimento flexible.

De acuerdo a lo anterior, se pretende con esta investigación proporcionar una alternativa funcional a la adición de plástico tipo PET, bajo las normativas del Instituto Nacional de Vías INVIAS a las mezclas asfálticas y de esta manera aportar a la reducción del impacto ambiental, basados el concepto de reciclaje.

Por lo anterior, y acorde a la generación de nuevos productos a partir de los desechos, se desarrolla la propuesta del uso de pavimentos flexibles con mezclas asfálticas que incluyan plástico tipo PET, como una solución en cuanto a la disposición final de los desechos, que pueda generar beneficios a la calidad de vida, al mejoramiento del tránsito y al medio ambiente; partiendo desde las características físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas con plástico tipo PET obtenidas bajo la investigación realizada con base a estudios ya ejecutados y en comparación con las mezclas asfálticas convencionales reglamentadas bajo las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS; y determinando el aporte estructural de estas, en un pavimento flexible para bajo tráfico diseñado a partir de los parámetros elásticos típicos.



## **PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

### **3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Al incluirse el plástico en la vida cotidiana, un porcentaje considerable de estos desechos comienzan a acumularse en el medio ambiente, ya que estos son resistentes a la corrosión, la intemperie y tienen una degradación lenta producida por los microorganismos.

Teniendo en cuenta esto, se puede generar la utilización de plásticos tipo PET en las mezclas asfálticas, mediante la adición por vía seca, de tal manera que este tipo de mezclas puedan ser utilizadas para bajo volúmenes de tránsito, validando su aporte estructural en relación con los pavimentos flexibles convencionales utilizados actualmente.

### **3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

El eje de la investigación radica en la evaluación del uso de mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET en pavimentos flexibles; diseñando con esto una alternativa para el manejo de los residuos plásticos.

La aplicación y el uso de este material en los pavimentos flexibles lograría incluir un porcentaje de los desechos plásticos producidos actualmente; para ello es necesario utilizar un método de modelación convencional para mezclas asfálticas con inclusión de PET, el cual plantee la calidad del material y el comportamiento del mismo mediante normas técnicas adaptadas al uso del plástico, simulando diferentes escenarios del proceso y proponiendo diseños equivalentes a los especificados por el INVIAS con el fin de identificar, evaluar el funcionamiento del mismo y finalmente poder determinar ¿Qué efectos en términos de capacidad estructural tiene la inclusión de plástico tipo PET en las mezclas asfálticas en caliente en una estructura de pavimento?

## **OBJETIVOS**

### **4.1 GENERAL**

Efectuar un análisis comparativo de la capacidad estructural de un pavimento flexible de estructuras convencionales respecto a estructuras con mezclas asfálticas modificadas con plástico tipo PET para vías de bajo tráfico empleando especificaciones INVIAS.

### **4.2 ESPECIFICOS**

- Investigar con base en estudios ya realizados la caracterización mecánica de las mezclas asfálticas con inclusión de plástico PET mediante vía seca.
- Comparar los valores de las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales respecto a las mezclas con inclusiones de plástico tipo PET.
- Efectuar un análisis elástico multicapa de los pavimentos flexibles con mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET empleando los parámetros de resiliencia obtenidos en la investigación realizada de estudios ya efectuados.
- Comparar el aporte estructural de un pavimento flexible con inclusión de plástico PET respecto a mezclas asfálticas convencionales a partir de la modelación de los mismos.

## **ALCANCES Y LIMITACIONES**

### **5.1 ALCANCE DEL PROYECTO**

Este trabajo presentará el aporte estructural de las mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET; así como los espesores de las capas de rodadura propuestos para tránsito bajo de un pavimento flexible a partir de las especificaciones del INVIAS como propuesta de solución para manejo de desechos plásticos, reducción de la contaminación y manejo de energía.

### **5.2 LIMITANTES**

- Los diferentes procesos de producción de mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET, debido a las diferentes temperaturas de mezclado, dimensiones de agregados pétreos y tamaños de partículas de Tereftalato de Polietileno (PET).
- La ausencia de modelos de desempeño, bien sea fatiga o deformación permanente para plástico tipo PET.
- Este proyecto determinara el espesor de la carpeta asfáltica con adición de plástico tipo PET únicamente por la adición mediante vía seca.
- El tipo del plástico utilizado para producción mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET por su desconocimiento de procedencia y fabricación en la producción.
- Se verificará únicamente la deformación a tracción de la fibra interior de la carpeta asfáltica y el esfuerzo vertical sobre la subrasante.
- Los diseños deben ser calibrados a partir de tramos de prueba, por ende, el proyecto llegara únicamente a investigaciones a nivel de diseño.

## ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo es una recopilación de estudios recientes sobre el estado actual del conocimiento sobre las propiedades resilientes de mezclas asfálticas con adición de PET, los cuales ya han sido ejecutados en diversos países, algunas investigaciones se describirán a continuación:

El estudio “Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt” (Wan, M.N, 2013) tuvo como objetivo determinar la calidad óptima y el uso del efecto del PET reciclado como reemplazo parcial del agregado fino en la mezcla de asfalto modificado determinando así el comportamiento de deformación y rigidez permanente. Este se desarrolló por pruebas, donde las muestras estuvieron sometidas a una carga axial de carga repetida durante aproximadamente 1800 ciclos y una carga axial aplicada de 100 KN, con esto determinaron la deformación permanente de la mezcla. También realizaron la prueba del módulo de rigidez a tracción indirecta y se ejecutó para evaluar el asfalto modificado donde tenía un reemplazo del 20% con PET. Es así como llegaron a la conclusión de que el PET siendo un reemplazo del agregado fino tenía la suficiente capacidad de mejorar las propiedades de deformación de la mezcla y por tanto sería adecuada para ser implementada en pavimentos de carreteras.

Por otra parte, a partir del estudio de “Viabilidad técnica de obtención de un diseño de mezcla asfáltica adicionada con 3.8% de PET, que cumpla con la normatividad del INVIAS” (González, A.E., et, 2016), determinaron las cualidades adicionales que generarían los materiales reciclables para los pavimentos ecológicos, los cuales en un futuro brinden a diferentes proyectos la viabilidad del uso de esta reutilización en construcción y por ende adoptarse de manera mucho más constante. Esta investigación concluyó que al adicionar PET requería de más material grueso o sea cambiaba la relación entre los agregados, donde su porcentaje de vacíos aumenta y afecta la durabilidad del pavimento puesto que era alta, ya que no alcanza el valor requerido para vacíos llenos de asfalto el cual está entre 65 – 78%. Según el laboratorio realizado se evidenció la relación entre los vacíos generados por el material y los vacíos llenos de asfalto, incumpliendo con la normativa ya que el porcentaje de PET se adhirió al material fino sin cubrir los respectivos vacíos. En cuanto a los ensayos de las briquetas, se identificó que su comportamiento era rígido.

Navarro, J, (2017)., en su tesis tenía como objetivo elaborar una mezcla asfáltica en caliente adicionando PET para determinar la estabilidad y flujo, allí se realizaron los ensayos tomando un 65% de arena, un 35% de piedra, un 4.5 – 6.5% de asfalto y de PET entre 0.3 y 0.5%, luego se ejecutó el ensayo Marshall obteniendo un factor de estabilidad de 10.25 KN y un flujo de 540 Kg. Concluyendo que el PET se limita a un pavimento de tránsito liviano ya que reduce la estabilidad y el flujo.

José Forigua Orjuela y Elkin Pedraza, (2014)., presentaron un diseño de mezclas asfálticas modificadas mediante la adición de plástico, donde el diseño determinaba el porcentaje

óptimo de plástico en la mezcla modificada y su determinación de los parámetros Marshall. Se concluyó que, de acuerdo a los resultados de los parámetros de estabilidad, peso unitario y módulo de rigidez para las partículas de plástico, el porcentaje óptimo que mejora las propiedades mecánicas del asfalto se encuentra alrededor de 0.4%. También se evidenció que en porcentajes del 0.1 – 0.2% de plástico, compactadas con 25 y 0 golpes redundaba en una disminución del orden del 55% de los parámetros Marshall con respecto a si no se incorporara plástico en la mezcla, circunstancia que también se observa en valores mayores al óptimo de 0.45%.

De acuerdo al artículo científico “Efecto del PET sobre la rigidez de las mezclas de asfalto caliente” (Movilla Quesada, et., 2019), se enfocaron en el comportamiento mecánico de una mezcla de asfalto incorporando partículas gruesas de PET el cual proviene de reciclar botellas, donde utilizaron la prueba de flujo Marshall y estabilidad, y también la prueba de módulo de resiliencia a 5 °C y 22 °C. Llegando a la conclusión de que a mayor cantidad de partículas PET éstas se vuelven dominantes e interrumpen la función de la mezcla, por lo cual se debe hallar un contenido óptimo para mejorar las propiedades mecánicas. También evidenciaron que el incremento de ductilidad con la adición de polímeros generando mayor deformabilidad al alcanzar la falla de estabilidad y respecto al análisis de vacíos se concluyó que al agregar PET también se crean espacios en las mezclas, produciendo una mezcla más flexible. Finalmente, concluyeron que el porcentaje óptimo es de 14% de partículas de PET, debido a que este porcentaje permitió mayor estabilidad y menos rigidez.

Mershed, K; Mohammed, B y Adil D. (2015) evaluaron el empleo de PET proveniente de botellas como aditivos en mezclas para superar los inconvenientes del pavimento. Para tal fin realizaron 5 diferentes proporciones de PET (2%, 4%, 6%, 8% y 10%), sus pruebas incluyeron la determinación de la densidad aparente, la estabilidad y porcentajes de aire. Luego de realizadas las investigaciones consiguieron que el contenido modificador era de 8% con PET, indicando que este porcentaje se encontraba dentro de los parámetros y rangos establecidos para las propiedades físicas de la mezcla de asfalto. También evidenciaron que en las mezclas modificadas los valores de densidad aparente, estabilidad y rigidez aumentan, mientras que los valores de VMA disminuyen. Adicionalmente, el agregado tiene menos vacíos permeables por asfalto, debido a la naturaleza impermeable del plástico.

En la “Modificación de una mezcla asfáltica en caliente utilizando residuos de botellas de tereftalato de polietileno” (Mancy, 2017), se adoptó la utilización de botellas tipo PET molidas con un tamaño de partículas de 2.36 mm para reemplazar una parte equivalente del agregado fino. Se realizaron pruebas de laboratorio como Marshall, pruebas de susceptibilidad al ahuellamiento y pruebas de resistencia tanto de muestras modificadas como no modificadas. Evidenciando que la adición de PET mejora las propiedades, obteniendo el 0.5% como contenido óptimo para la incorporación a la mezcla asfáltica. También se tuvo como alternativa el 0.3%, ya que este presentó bajo flujo y alta rigidez.

También según el artículo científico “Caracterización del tereftalato de polietileno reciclado como reemplazante parcial del agregado fino, propiedades y comportamiento de mezclas asfálticas para pavimentos de carreteras” (Abdul y Affendy, 2016), diseñaron la evaluación

del reemplazo del PET para el agregado fino de la mezcla de asfalto determinando propiedades de fatiga y rigidez, donde reemplazaron en un 25% el agregado fino por PET llegando a la conclusión de que mejoró todas las propiedades físicas de la mezcla de asfalto para pavimento de carreteras.

Romero, Huertas y Cazar, (2015)., en su revista “Diseño y evaluación de mezclas asfálticas de pavimentos flexibles con la adición de PET como material constitutivo”, dijeron que el uso de PET posee valores superiores de estabilidad y flujo, cuando se tienen briquetas con 13.6% de PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante el tamiz #10, pues evidenciaron una estabilidad del 33% y un flujo mayor de 32% en comparación con el convencional, mientras que el PET triturado y retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8 presenta valores menores de estabilidad pero mayores en flujo con respecto al convencional.

En su tesis “Características de Rendimiento del Asfalto Modificado con PET (Tereftalato de Polietileno)” (Earnest, 2015), se ejecutó una evaluación sobre el rendimiento del PET como modificador de asfalto, durante esto él realizó pruebas con aglutinante y pruebas de mezcla de asfalto. Estas pruebas de mezcla con PET las realizó tanto en proceso húmedo como en seco, y en una mezcla sin modificar, los contenidos utilizados fueron de 5%, 10% y 15% de PET. Logrando llegar a la conclusión de que el 10% de incorporación es el óptimo para generar un comportamiento estable y excelente de la mezcla asfáltica. Se basó en los resultados de DRS (Suelos y Pavimentos) y RV (Vidrios), como del rendimiento de las mezclas modificadas. Adicionalmente, indico que el proceso en seco de la adición de PET puede mejorar la resistencia al daño permanente por humedad y en cuanto al comportamiento de las partículas dentro de la mezcla genera contenidos de vacíos de aire mucho más altos.

Dentro de la investigación llamada “Incorporación de Tereftalato de Polietileno como agente modificador en el asfalto” (Martínez, 2014). Se planteó encontrar el porcentaje de uso óptimo de PET dentro de la mezcla asfáltica. Donde se realizó ensayos de comportamiento mecánico a los agregados y diseño mediante Marshall, se supuso un porcentaje de asfalto en la mezcla del 5% y uso el PET como parcial de arena, asumiendo tres valores (5%, 8% y 11%), analizando también la estabilidad y flujo de la mezcla modificada. Llegando a la conclusión de que estas mezclas al ser modificadas con los diferentes porcentajes de PET, indican una solución alternativa respecto a las mezclas tradicionales, encontrando en ellas propiedades mecánicas óptimas en cuanto a la estabilidad.

En otra tesis titulada “Comparación técnica y económica entre las mezclas asfálticas tradicionales y reforzadas con plástico reciclado” (Velásquez, 2017). Su objetivo principal es determinar un mejor comportamiento de la carpeta asfáltica adicionando plástico reciclado en comparación con las carpetas asfálticas convencionales. En esta se fabricaron muestras con diferentes porcentajes de PET como 0.5%, 1% y 1.5% del agregado fino, en donde se concluyó que el óptimo contenido el cual revela mejores características tanto físicas como estructurales de la mezcla asfáltica es la del 1%.

También se comprobó dentro de esos estudios que la deformación por carga adicionando PET en cuanto a los ensayos Marshall, genera una resistencia mayor en un 3.11% frente a la

mezcla tradicional. Y la relación que existe entre deformación y capacidad para soportar cargas de la mezcla modificada con plástico y la mezcla convencional incrementa un 4.49%. Todo lo anteriormente mencionado económicamente genera un ahorro del 2.63% en cuanto a la producción de la mezcla asfáltica, mostrando que el plástico actúa como un buen agente modificador del agregado fino.

En la investigación de Amir Modarres y Hamidreza Hamedi, donde su objetivo principal es relacionar el efecto de las botellas tipo PET sobre la rigidez y sobre todo las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas a temperaturas diferentes, en este caso 5 y 20 °C. En esta mezcla se agregaron directamente el 2 – 10% de PET, como método de proceso en seco. Continuamente, se realizaron ensayos de módulo de resiliencia y fatiga con procedimiento de carga de tracción indirecta.

**FIGURA 1. PARTÍCULAS DE PET TRITURADO**



**OBTENIDO DE:** AMIR MODARRES Y HAMIDREZA HAMED, 2013

Donde concluyeron que la adición del 2% de PET, redujo el módulo resiliente a ambas temperaturas tanto de 5 como de 20 °C. Sin embargo, en todos los contenidos de PET utilizados, las cantidades de módulo de resiliencia se encontraban en un límite aceptable. También en la adición del contenido de PET hasta un 10% tuvo efectos satisfactorios para lo cual el PET mejoró el comportamiento a la fatiga en ambas temperaturas.

En la tesis “Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC – 19 con incorporación de PET reciclado como agregado constitutivo” (Andrés Berrio, 2017). Se hizo un desarrollo experimental basado en el análisis de mezclas con adición de PET triturado, partiendo de la determinación de sus parámetros volumétricos, prueba de estabilidad y flujo, como también de los ensayos de módulo resiliente y deformación plástica. Los porcentajes de PET utilizados para el trabajo son de 0.5%, 1%, 2% y los tamaños evaluados están entre 0.5 y 5.0 mm.

**FIGURA 2. PET TRITURADO 0.5, 1 Y 2%.**



**OBTENIDO DE:** ANDRÉS BERRIO, 2017

Para esta tesis, se llevó a cabo el ensayo Marshall, donde 9 tipos de mezcla se evaluaron y cumplieron los requerimientos esperados. En el caso del flujo solo 3 tipos de mezcla estuvieron por debajo del límite de 3.5 mm, valores mayores son considerados mezclas frágiles, difícilmente recuperables y poco convenientes para las estructuras de pavimento. A nivel general los tamaños de PET pequeños (0.5 – 2.0 mm) presentaron óptimos porcentajes de adición, cuya estabilidad decrece a medida que se aumenta o disminuye la dosificación; pero para los tamaños de PET grandes (5.0 mm) a medida que se aumentaba la cantidad adicionada decrecía la estabilidad de la mezcla.

También se tiene que en la mezcla de partículas de 5.0 mm con adición del 0.5%, se evidencio mejoría en el módulo resiliente en un 14% y en la deformación plástica se obtuvo un aumento de 83%, lo que no es conveniente ya que se relaciona con probabilidades altas de ahuellamiento. En una mezcla con partículas de 0.5 – 2.0 mm y una adición del 1% se mejoró el módulo resiliente en un 37% y la deformación plástica presento una disminución de 42%, lo que lleva a deducir que el módulo resiliente es un tanto más rígido y puede recuperarse ante las deflexiones causadas por el tránsito.

Choundhary, Kumar y Murkute, (2017), en su investigación presentaron el efecto de la incorporación del PET sobre las propiedades de las mezclas asfálticas en términos de proceso de adición, contenido de PET y tamaño de PET, donde utilizaron contenidos de (2.5%, 5%, 7.5%) y tamaños de 2.36 – 1.18 mm y 0.30 – 0.15 mm). En esta investigación se evalúan las propiedades volumétricas, parámetros Marshall y características de susceptibilidad a la humedad de las mezclas modificadas. El proceso de adición utilizado es el seco modificado, y a partir de allí se tuvo como conclusiones que hasta un contenido de PET del 5% es cuando se presenta mayor estabilidad, mayor resistencia a la deformación, pero menor flujo. Respecto a la susceptibilidad a la humedad, los resultados arrojan que los niveles más altos se obtienen cuando se utilizan partículas de PET gruesas, logrando así una mejor resistencia al daño por este.



## MARCO TEÓRICO

A continuación, son abordados ítems de los temas relacionados con el objetivo de la investigación, especialmente con la caracterización del plástico tipo PET, conceptos de resiliencia en pavimentos y parámetros de evaluación típicos en pavimentos flexibles. El estudio que aquí se presenta es una iniciativa para la reutilización de residuos plásticos tipo PET, la cual es una alternativa de sustitución de los agregados convencionales adicionando a las mezclas asfálticas partículas de este material contribuyendo así al medio ambiente y a la economía en cuanto a la construcción de vías futuras.

### 7.1 PAVIMENTOS FLEXIBLES

Se habla de pavimento flexible cuando la estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre este. Se caracterizan por estar conformados principalmente de una capa bituminosa, que se apoya de otras capas inferiores llamadas base y sub-base. Sin embargo, es posible prescindir teóricamente de estas capas dependiendo la necesidad de la obra.

Según Sánchez & Campagnoli (2016), en la construcción de carreteras se utilizan dos tipos de pavimentos los cuales se diferencian por sus funcionalidades y características, entre rígidos y flexibles. Por lo anterior, se dice que los pavimentos rígidos son los que tienen como revestimiento superficial una capa de concreto hidráulico, que descansa sobre un material granular. Mientras, que los pavimentos flexibles están compuestos por una transición de capas granulares un poco más robusta, la cual varía según la condición de trabajo al que será sometida.

El revestimiento de concreto, es una capa que tiene por objetivo recibir las acciones que ejerza el tráfico y por ende transmitir las a los materiales que se encuentren por debajo de ella, también debe mantener un nivel de impermeabilización y un nivel de servicio dentro de rangos óptimos. Según el Ministerio de Transporte (2015), las mezclas asfálticas cubren cerca del 80% de las capas de rodadura en las carreteras en Colombia.

### 7.2 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Son el producto de una combinación entre ligantes de cierto origen y agregados pétreos, los cuales según estudios de laboratorio tienen previas proporciones estipuladas. Pueden estar elaboradas en caliente, tibia o en frío; y en algunas ocasiones son preparadas directamente en la propia vía.

Las mezclas asfálticas en caliente, son aquellas que se colocan a temperaturas arriba de los 140 °C, según la norma por INVIAS (2013), las subdivide de acuerdo a la constitución granulométrica lo cual forja variaciones en el contenido de vacíos al interior.

En la tabla 1, se presentan los tipos de mezcla definidos de acuerdo a su composición granular.

**TABLA 1. TIPOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE**

<b>Tipo de Mezcla.</b>	<b>Denominación</b>	<b>Definición</b>
Mezclas densas	MDC	Tienen una curva granulométrica continua y bien gradada, buscando un mínimo de vacíos
Mezclas semidensas	MSC	Tienen una curva granulométrica continua, pero presenta insuficiencia en algunos tamaños, lo que evidencia un % de vacíos controlado
Mezclas gruesas	MGC	El tamaño de las partículas es mayor y por lo tanto es apreciable a nivel superficial, tiene un acabado rugoso y un % de vacíos por encima de la mezcla semidensa

**Obtenido de:** Comportamiento mecánico de misturas asfálticas con inserción de PET. Arao, M (2016)

Según lo anterior, una mezcla en caliente tiene la condición de que los agregados poseen diferentes tamaños, constituyendo una estructura cerrada con un contenido de vacíos controlado el cual debe variar entre 3% y 8%, y es está la diferencia principal con respecto a las mezclas densas donde su porcentaje de vacíos es mucho más mínimo que este.

Este tipo de mezclas no presentan variaciones tan marcadas respecto a la rigidez de las mezclas densas y su durabilidad se define en su mayoría por la resistencia a la abrasión. (Morales, 2008).

### **7.2.1 Propiedades de las mezclas asfálticas.**

Al momento de considerar y realizar el diseño de mezclas asfálticas para pavimentos, se debe tener en cuenta primordialmente:

1. *Estabilidad:* Se le denomina así a la capacidad que posee la mezcla asfáltica para resistir deformaciones generadas por la carga del tráfico vehicular. Esta propiedad depende de factores como la fricción interna y la cohesión. Donde la primera

depende a su vez de la textura superficial, de la granulometría y de la cantidad de asfalto; y la segunda depende totalmente de la cantidad de asfalto que exista en la mezcla y aumentará hasta cierto punto, para luego mejorar dicha propiedad. (Instituto del Asfalto, 1985)

2. *Durabilidad*: Es la capacidad que tiene la mezcla asfáltica para resistir la desintegración que corresponde a las cargas de tránsito sometidas y a la climatología presentada durante su vida útil. Esta depende principalmente de la cantidad de vacíos de aire presentes en la mezcla, ya que según la cantidad de estos vacíos se genera el aumento en la velocidad de deterioro. (Instituto del Asfalto, 1985)
3. *Flexibilidad*: Nivel de adaptación de la mezcla a los asentamientos y movimientos tanto en la base como en la subrasante, ya que en la construcción de las capas del pavimento se hace algo imposible tener una densidad uniforme del suelo. Su mejoría se presenta con el aumento en el contenido de asfalto y el uso de agregados de granulometría abierta. (Minaya y Ordoñez, 2006)

También, dentro de las propiedades se debe considerar lo siguiente:

4. *Resistencia a la Fatiga*: Esta propiedad describe el soporte de flexiones repetidas por el paso de las cargas vehiculares que transitan por dicho pavimento. Es por esto, que la cantidad de asfalto es demasiado importante cuando se tiene esta propiedad en cuenta, pues al aumentar el contenido de asfalto se aumenta la resistencia a la fatiga. Adicionalmente, se deben tener agregados granulométricos densos y bien gradados lo cual colaboran con el mejoramiento de la misma. (Instituto del Asfalto, 1985)
5. *Resistencia al Deslizamiento*: Es la capacidad que tiene la superficie del pavimento de brindar resistencia al resbalamiento, sobre todo cuando está presente humedad. (Instituto del Asfalto, 1985)
6. *Impermeabilidad*: Es la cabida del medio para impedir el paso de aire y agua. Por lo tanto, esto se relaciona con el porcentaje de vacíos en el aire de la mezcla compactada y acceso que se genere de estos con la superficie. (Minaya y Ordoñez, 2006)
7. *Trabajabilidad*: Es la facilidad con que se dispone y compacta la mezcla. (Minaya y Ordoñez, 2006)

### **7.2.2 Concreto Asfáltico.**

También es conocida como HMA (Hot Mixed Asphalt), la cual se caracteriza por presentar una granulometría bien gradada y con diferentes tamaños en sus partículas sólidas mezcladas con el cemento. Dichas mezclas deben fabricarse, compactarse y esparcirse a alta temperatura aproximadamente entre 140 – 180 °C (todo depende de la viscosidad). Adicionalmente, presenta bajos contenidos de vacíos con aire en volumen. (Rondón & Reyes, 2015)

### **7.3 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)**

Es conocido como PET, es un polímero termoplástico que tiene una estructura alifática y aromática, semi – cristalina y forma parte de los poliésteres. Su nombre oficial es polioxitereftaloila de oxietileno.

Los termoplásticos son polímeros que tienen la capacidad de tornarse fluidos con el calentamiento, y luego de un proceso de enfriamiento, vuelven a su estado inicial sin ningún cambio en sus propiedades. Esto permite que los termoplásticos puedan ser moldeados y reciclados sin generar ningún tipo de afectación en sus propiedades físicas.

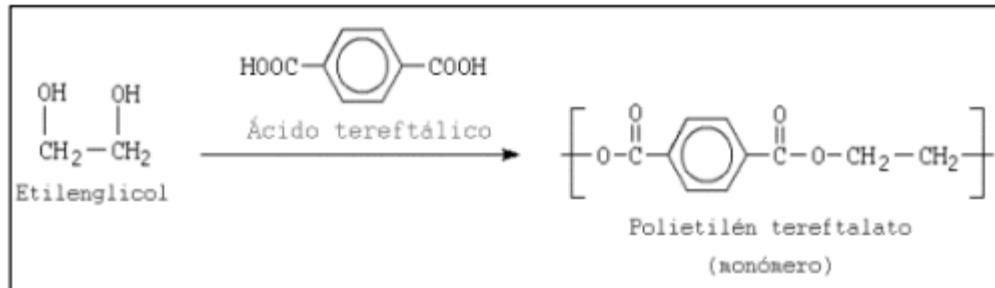
Algunas características del PET sobre otros tipos existentes de termoplásticos son: facilidad de procesamiento, estabilidad térmica, química e hidrolítica, resistencia mecánica a temperaturas altas, baja densidad, transparencia y bajo costo. (Fuentes et al., 2008)

El PET fue producido por los químicos británicos, John Rex Whinfield y James Tennant Dixon, en 1941, desde entonces fue recibido en el espacio de los materiales industriales por su alta temperatura de fusión, que es alrededor de 260 °C. Este material al tener anillos aromáticos en su cadena principal le dificulta el acceso a materiales que puedan generarle degradación. A inicios, el PET se utilizaba en fibras para la fabricación de tejidos, ya que inmediatamente después de la II Guerra Mundial, se presentó carencia en la industria textil, por lo que este constituyó una alternativa viable para sustituir los materiales tradicionales. De 1970 en adelante, las primeras botellas de PET se fabricaron en Estados Unidos y Europa. En Colombia, el PET se utilizó en 1989 en la industria textil, pero solo en 1992 se empleó en el mercado para lo relacionado con empaques. Actualmente, la producción de PET a nivel mundial está cerca de los 30 millones de toneladas por año, donde el 70% esta destinados a industria de empaques, siendo la mayor parte de bebidas. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016)

El polietileno de tereftalato (PET), es un polímero bastante duro, dimensionalmente estable y lineal, por lo cual es idóneo para ser transformado mediante diferentes procesos como la extrusión, inyección, soplado y termoformado. (García, 2017).

El PET es obtenido mediante la condensación de dos compuestos como etilenglicol y ácido tereftálico, quien asume el papel en las fibras y materiales de moldeo, representado de la siguiente manera:

**FIGURA 3. REACCIÓN QUÍMICA DEL PET.**



OBTENIDO DE: [HTTPS://WWW.QUIMINET.COM/ARTICULOS/TODO-LO-QUE-QUERIA-SABER-DEL-PET-2806.HTM](https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm)

### 7.3.1 Características y propiedades.

Cuando se tiene una botella PET como envase, se piensa que está ya cumplió su uso y se consideraría como desecho. Sin embargo, todo tipo de tereftalato de polietileno puede ser reusado debido a las características y propiedades que presenta, dentro de estas se encuentran unas que menciona Sherwell Betancourt (2014):

- Que actúa como barrera para los gases, por ejemplo, el CO<sub>2</sub>, la humedad y el O<sub>2</sub>
- Es transparente y cristalino, aunque a veces asiente algunos colorantes
- No es tóxica a cierto grado, ya que estos plásticos tienen cierto límite en cuanto a la toxicidad, lo cual es una cualidad que está al alcance del público
- Alta resistencia química y nivel alto en cuanto a sus propiedades térmicas.
- Irrompible, liviano e impermeable
- Reciclable en su totalidad y estabilidad a la intemperie
- Resistencia a esfuerzos permanentes y al desgaste, alta rigidez y dureza
- Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad

### 7.3.2 Clasificación del Tereftalato de Polietileno (PET).

Los polímeros según su aplicación se clasifican en función de cómo se encuentren enlazados químicamente o unidos por fuerzas intermoleculares y la disposición de diferentes cadenas que conforma el polímero, los materiales resultantes son:

**TABLA 2. CLASIFICACIÓN DE LOS POLÍMEROS SEGÚN SU USO**

TIPO	MATERIAL	APLICACIONES
Termoestables	Resina Poliéster	Encapsulados, láminas acanaladas Apagadores de luz Vajillas Colchones, espumas y rellenos
	Resina Fenólica	
	Resina	
	Melamínica	
	Poliuretano	
Termoplásticos	Polietileno Tereftalato (PET)	Botellas, envases termoformados
	Polietileno baja densidad	Bolsas
	Polietileno alta densidad	Bolsas tipo papel, tuberías, cubetas, macetas, botellas
	Cloruro de polivinilo (PVC)	Juguetes, cable eléctrico, mangueras, tarjetas de crédito, etc.
	Polipropileno (PP)	Recipiente de comida, sillas para jardín, películas, ganchos.
	Poliestireno (PS)	Estuches de cosméticos, envases, termoformados
	Acrilonitrilo - butadieno - estireno	Carcasas de teléfonos, batidoras, licuadoras, máquinas de escribir
	Nylon	Engranajes, ruedas de patines
Elastómeros	Caucho sintético, látex, neopreno	Neumáticos, guantes, trajes especiales impermeables
Fibras	Poliamidas y poliésteres	Tejidos impermeables, tejidos de alta resistencia, mallas en invernaderos








Obtenido de: Clasificación de los polímeros. Llorens, J (2008)

Los termoestables hacen referencia a la estructura altamente reticulada (aporta baja elasticidad) que poseen los materiales y el cual es responsable directo de las altas resistencias mecánicas y físicas. Los termoplásticos son los que permiten deformarse cuando son calentados y tienen buena resistencia al fenómeno de la fluencia. Los elastómeros se caracterizan por su alta elongación y flexibilidad de la cual disponen.

En este proyecto se utiliza el plástico tipo PET (Polietileno Tereftalato), donde la fabricación de los envases se consigue mediante diferentes procesos los cuales parte de la resina del PET se obtiene de dos materias derivadas del petróleo: etileno y paraxileno.

Para la recolección, reciclaje, identificación y separación de los diferentes productos de plástico, se tienen unos códigos desarrollados los cuales se pueden evidenciar en la tabla 3. Sin embargo, se presenta dificultad a la hora de reciclar este material ya que al utilizar plásticos diferentes y al mezclarse se obtienen productos de bajas prestaciones, lo que significa que hay que separar cuidadosamente los residuos encareciendo el proceso. También hay algunos que se producen en cantidades tan pequeñas que no resulta rentable recogerlos, separarlos y reciclarlos.

**TABLA 3. SISTEMA DE CÓDIGOS DE LOS PRINCIPALES PLÁSTICOS**

CÓDIGOS		RECOMENDACIONES
	PET (Polietileno de Tereftalato) Reciclado 23%	Diseñados para un solo uso. Su uso extendido aumenta el riesgo de filtraciones y bacterias
	HDPE (Polietileno de Alta Densidad) Reciclado 27%	Considerado seguro
	PVC (Policloruro de Vinilo) Reciclado 1%	Evitar. Puede filtrarse en la comida o el líquido de envase
	LDPE (Polietileno de Baja Densidad) Reciclado 1%	Considerado seguro
	PP (polipropileno) Reciclado 3%	Considerado seguro
	PS (Poliestireno) Reciclado 1%	Evitar. Puede filtrar el estireno, un posible causante del cáncer y alteraciones hormonales
	OTROS (A menudo policarbonatos) Reciclado 1%	Evitar. Puede filtrar el bisfenol A, posible causante de daño cromosómico.

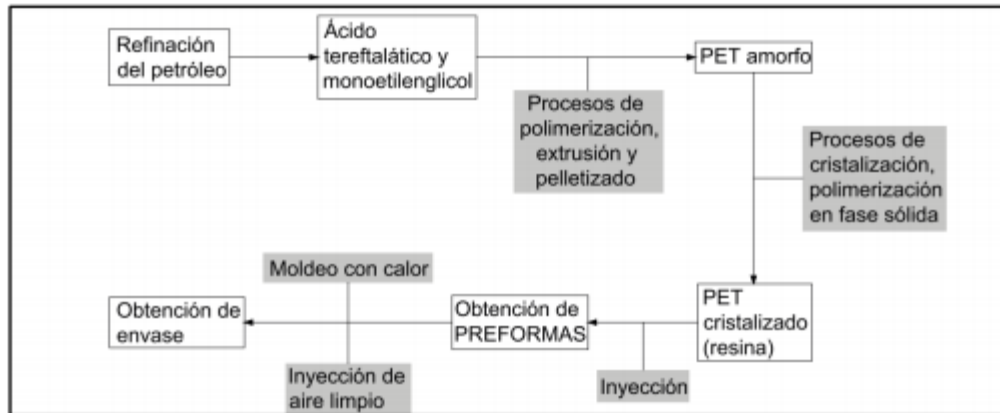
Obtenido de: La Sociedad Industrial del Plástico. Llorens, J (2008)

### 7.3.4 Proceso de producción del PET.

Para la fabricación del PET, se han realizado algunas estrategias para minimizar los impactos ambientales durante la producción del material, de los cuales se puede tener en

cuenta que se usa el gas natural como una fuente energética que genera vapor y favorece a las fases de calentamiento, así mismo se mantiene controlado las emisiones atmosféricas mediante oxidantes térmicos, además de tener también un tratamiento de aguas residuales, entre otras cosas. (Sherwell, 2014)

**FIGURA 4. PRODUCCIÓN DE PET**



OBTENIDO DE: SHERWELL, G. (2014)

Los derivados de las materias primas del PET pasan por los procesos ilustrados en la figura 4 y los cuales se desarrollan de la siguiente manera:

- *Polimerización*

Mediante la esterificación, la cual consiste en eliminar el agua y el metano, para luego pasar a la fase de policondensación, donde el proceso está basado mediante catalizadores y a altas temperaturas aproximadamente 270 °C o más, llegando así a la polimerización de esta resina. Cuando se ha alcanzado la viscosidad deseada, se rompe el vacío al introducir nitrógeno en el envase, es ahí donde se detiene la reacción y este nitrógeno evita los posibles fenómenos de oxidación. Continuamente, esta masa se pasa por una matriz y cae en un recipiente que contiene agua donde se enfría y consolida, para así convertirlo en gránulos los cuales se tamizan y se envían a almacenamiento y fabricación. Este resultado vuelve al PET apto para la producción de botellas. (Hachi y Rodríguez, 2010)

- *Cristalización*

Luego de obtenerse la polimerización, el PET soporta un cambio de estructura y este proceso consiste más en un cambio físico donde sus moléculas pasan de una disposición espacial algo desordenada a una estructura regulada y uniforme, la cual le concede a la resina un cambio en su coloración de transparente a blanca lechosa, donde su método pasa por un sistema térmico entre 130 y 160 °C y a su vez el gránulo se mantiene en agitación por efecto de un movimiento mecánico. Con este proceso, la densidad del PET pasa de 1.33 g/cm<sup>3</sup> a 1.4 g/cm<sup>3</sup>. (Hachi y Rodríguez, 2010)



- *Post Polimerización*

Cuando se tiene el gránulo cristalizado, este se carga en un reactor durante un tiempo largo y siendo sometido a un flujo de gas (nitrógeno) a una temperatura elevada de más o menos 200 °C. Este tratamiento genera una reacción que hace aumentar el peso molecular de la resina entre 0.72 y 0.86, los cuales son valores idóneos para la fabricación de la botella

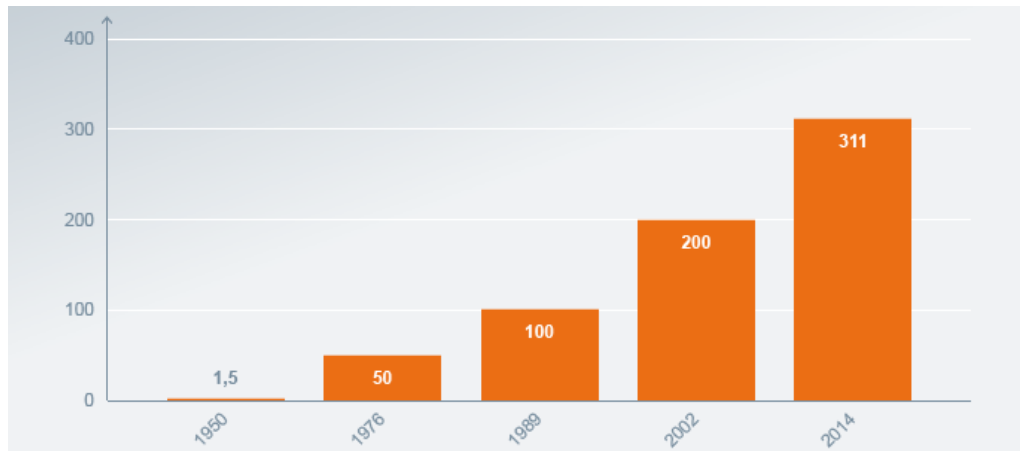
- *Inyección, Estirado y Soplado*

Una vez realizado el post polimerizado, el PET estará preparado para ser convertido en la botella bien sea para bebidas o para otros usos. El PET que es utilizado para botellas se representa en forma de pequeños cilindros y una vez secos se funden e inyectan a presión en máquinas de cavidades múltiples de las que se generan preformas. Luego se someten a un **PROCESO** de calentamiento gradual y posteriormente a un moldeado dándole el tamaño definitivo al envase. Así mismo, se soplan e inflan con aire a presión totalmente limpio hasta dar el molde final. (Hachi y Rodríguez, 2010)

### 7.3.5 Realidad actual del PET.

Desde su creación, la producción de plástico ha crecido exponencialmente como se ilustra en la figura 3, hoy en día el 4% del petróleo se destina a la producción de este material y otro 4% se emplea para el suministro de energía que se necesita para la fabricación. Y por este motivo, el plástico no es respetuoso con el medio ambiente, pues la mayor parte se utiliza para fabricar productos desechables, en lugar de productos duraderos.

**FIGURA 5. PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PLÁSTICO DE 1950 A 2014**

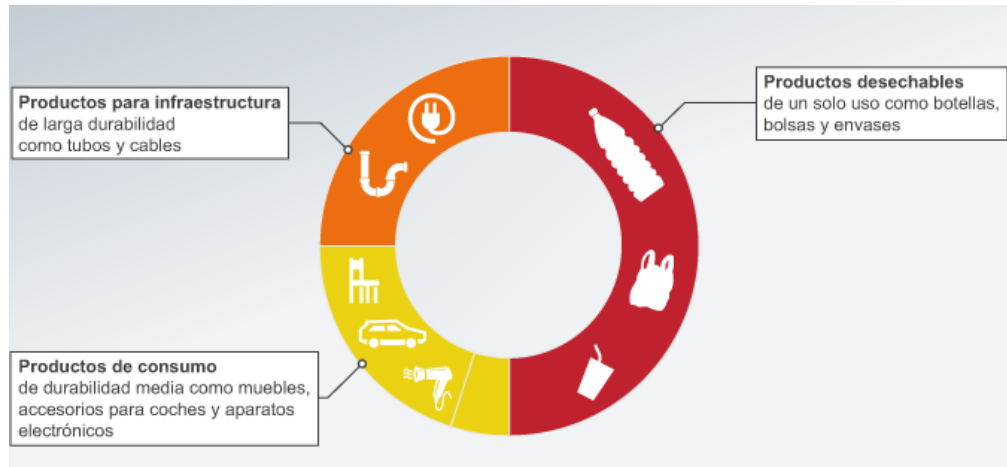


OBTENIDO DE: [HTTPS://WWW.DW.COM/ES/6-GR%C3%A1ficos-PARA-ENTENDER-EL-PROBLEMA-DEL-PL%C3%A1stico/A-36756148](https://www.dw.com/es/6-gr%C3%A1ficos-para-entender-el-problema-del-pl%C3%A1stico/a-36756148)

El mayor problema del plástico es relacionado con su utilidad, puesto que estos productos tienen una vida útil bastante corta y su desecho se genera con demasiada facilidad. Ningún tipo de plástico es biodegradable, y mucho menos los de uso común, la única manera de

eliminar esto, es por un procedimiento de descomposición como por ejemplo la pirólisis o incineración, teniendo en cuenta que este último no es tan recomendado por los efectos a nivel de salud y medio ambiente. (BBC News Mundo, 2017)

**FIGURA 6. UTILIZACIÓN DEL PLÁSTICO**

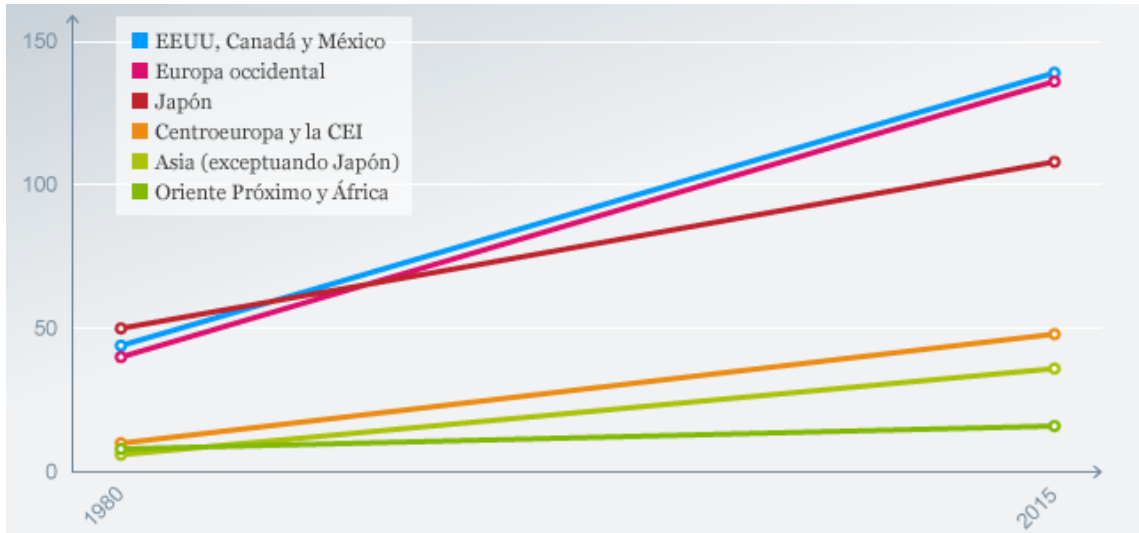


**OBTENIDO DE:** [HTTPS://WWW.DW.COM/ES/6-GR%C3%A1FICOS-PARA-ENTENDER-EL-PROBLEMA-DEL-PL%C3%A1STICO/A-36756148](https://www.dw.com/es/6-gr%C3%A1ficos-para-entender-el-problema-del-pl%C3%A1stico/a-36756148)

De acuerdo a la figura N° 6, la realidad actual de los plásticos en el mundo y sobre todo del PET, es muy preocupante, puesto que la magnitud del problema va en el aumento acelerado de la producción de este material, alcanzando los 322 millones de toneladas en 2015. Esta cantidad mencionada no incluye las fibras que se usan en la ropa, cuerdas u otros productos conjunta las cuales representan alrededor de 61 millones de toneladas en el año 2016. Se estima que este número seguirá aumentando aproximadamente llegando a duplicarse para el año 2025. Específicamente, los fabricantes de bebidas producen por encima de 500 mil millones de botellas de plástico los cuales tiene un solo uso cada año. (Greenpeace, 2015)

Estos residuos plásticos tipo PET, dependiendo del país entre el 22% al 43% van a parar a un vertedero, puesto que para su reciclaje no existen unos datos globales uniformes. Sin embargo y de acuerdo a la figura 5, Japón es uno de los grandes consumidores de plástico, pero tiene una tasa del 78% en reciclaje, siendo esta una de las más altas del mundo, pues muchos países ni siquiera se acercan a esta cifra. La Unión Europea quien es pionera en situaciones ambientales, solamente recicla el 26%.

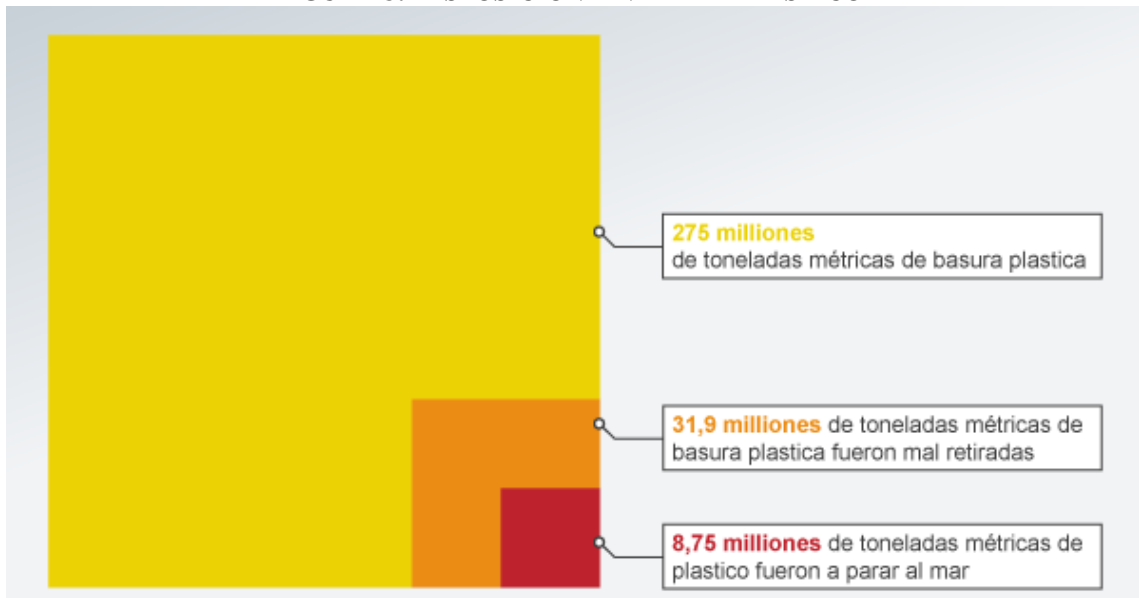
**FIGURA 7. CONSUMO GLOBAL DE PLÁSTICO**



OBTENIDO DE: [HTTPS://WWW.DW.COM/ES/6-GR%C3%A1ficos-para-entender-el-problema-del-pl%C3%A1stico/a-36756148](https://www.dw.com/es/6-gr%C3%A1ficos-para-entender-el-problema-del-pl%C3%A1stico/a-36756148)

Se han producido unos 8.3 mil millones de toneladas de plástico desde sus inicios que es cerca al año 1950. Además, se establece que tan solo un 9% del plástico total se ha reciclado, el 12% se ha incinerado y el 79% ha terminado en el medio ambiente. Unos 8.75 millones de toneladas de plástico finalizan su vida útil en el océano cada año, como se observa a continuación en la figura 8. (Greenpeace, 2015)

**FIGURA 8. DISPOSICIÓN FINAL DEL PLÁSTICO PET**



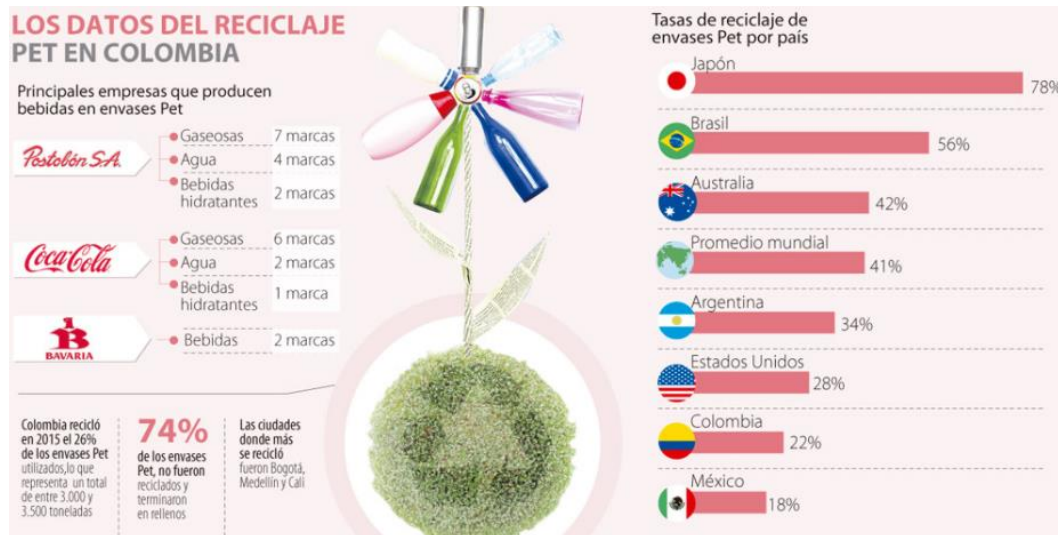
OBTENIDO DE: GREENPEACE, (2015)

Ahora bien, si se enfoca directamente en Colombia, las cifras de reciclaje del plástico tipo PET no son tan satisfactorias como se esperan, pues durante el 2015 en el país se recuperaron entre 3000 y 3500 toneladas de envases PET, lo que representan solamente un 26% del total. Bogotá, Medellín y Cali son las tres ciudades que tienen las mayores tasas de reciclaje. (Bedoya, 2016)

En el mercado general, las compañías productoras de bebidas como Postobón, Coca – Cola o Bavaria tienen dentro de su portafolio aproximadamente 24 productos envasados en botellas de plástico tipo PET. Sin embargo, una de las estrategias de Coca – Cola fue desarrollar la tecnología ecoflex en sus envases, con esto utiliza un 22% menos de plástico ahorrando material.

En un ranking realizado por Enka (Empresa de reciclaje), demuestra que Colombia se ubica por debajo de la media mundial en el reciclaje de botellas tipo PET. Según ese estudio, el promedio es de 41% y es superado por Japón con un 78%, seguido de Brasil con 56% y Australia con 42%. El único país que está por debajo de Colombia es México quienes reciclan solo el 18%.

**FIGURA 9. DATOS DE RECICLAJE PET EN COLOMBIA**



**FUENTE:** [HTTPS://WWW.LAREPUBLICA.CO/RESPONSABILIDAD-SOCIAL/SOLO-26-DE-LAS-BOTELLAS-PLASTICAS-SE-RECICLA-2357536](https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/so-lo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla-2357536)

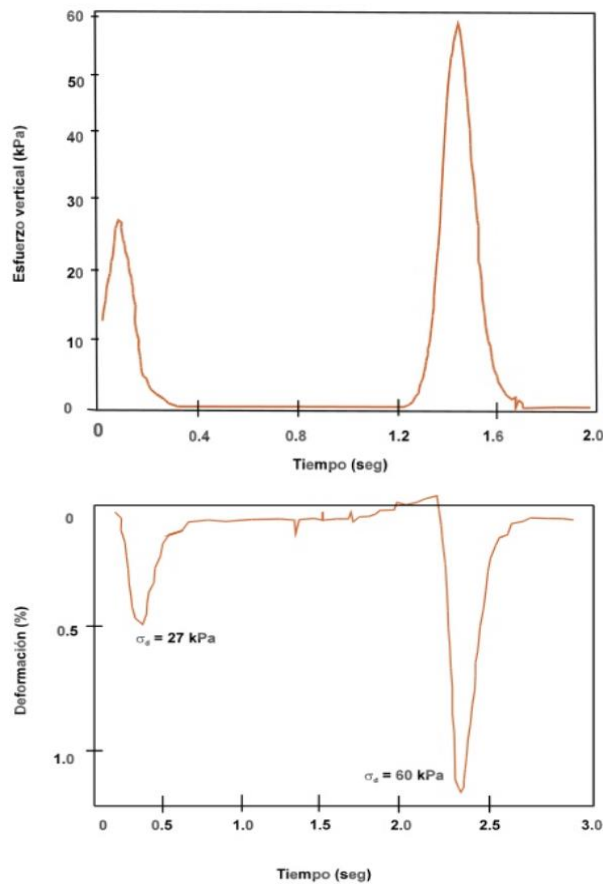
## 7.4 MÓDULO RESILIENTE

Es el parámetro más relevante en cuanto al diseño de pavimentos flexibles, se considera así por la condición de trabajo de las capas que están sometidas al tráfico, las cuales son cargas dinámicas cíclicas. Se entiende que en su gran mayoría los materiales del pavimento no son elásticos por lo tanto experimentan algún tipo de deformación

permanente luego de la aplicación de la carga al que sea sometido. Si la carga es pequeña en relación con la resistencia del material y se aplica un número de repeticiones considerable, la deformación es prácticamente recuperable, proporcional a la carga y puede estimarse como elástica. (Xiao, 2009)

El módulo resiliente se basa en la deformación recuperable bajo la acción repetida de cargas. El tipo y duración de las cargas que se utilicen en las pruebas de esfuerzo deben representar o simular lo que ocurre en campo. De acuerdo al diseño estructural del pavimento, a la magnitud, a las repeticiones de carga acumuladas, a las características del clima y a la posición de las diversas capas de materia, el comportamiento esfuerzo – deformación puede generar origen a deformaciones elásticas o inelásticas. Las primeras o también llamadas resilientes, pueden llegar a una recuperación instantánea. Para las inelásticas o denominadas plásticas, son las que permanecen en el pavimento después de generarse la causa de la deformación, pues esta tiende a hacerse acumulativa y logra valores inadmisibles para la mezcla asfáltica. Arao, M (2016)

**FIGURA 10. VARIACIÓN TÍPICA DE LA DEFORMACIÓN VERTICAL RESILIENTE EN UN PAVIMENTO CON CARPETA ASFÁLTICA**

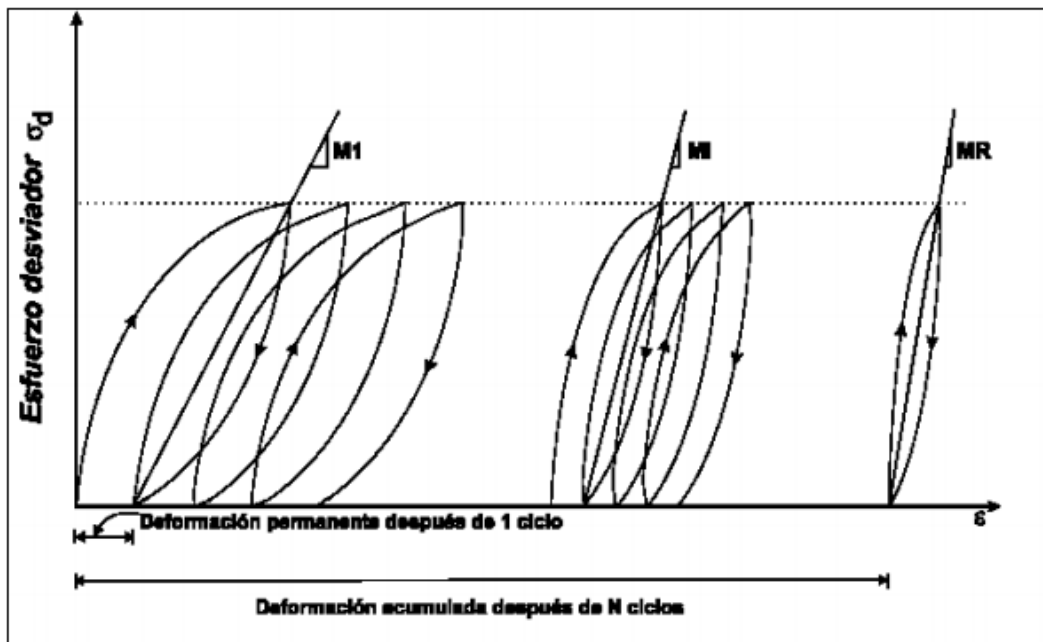


OBTENIDO DE: BROWN, (1994)

Con el fin de tener en cuenta la naturaleza cíclica de las cargas que actúan en los materiales que conforman la estructura de pavimento, así como el comportamiento resiliente de estos materiales, se han realizado trabajos experimentales tanto a escala como en laboratorio, obteniendo comportamiento de esfuerzo – deformación del pavimento. Según las gráficas de esfuerzos y deformaciones (figura 10) obtenidas mediante una estructura de pavimento sujeta a la aplicación de carga repetido por medio del paso de un vehículo. Estas corresponden a las mediciones en un punto ubicado a 35.0 cm de profundidad con respecto a la superficie de rodamiento. Es así, como se puede apreciar que la carga que transmiten los vehículos en forma de pulsos, cuya magnitud depende de la presión de las llantas y de la carga por eje; además, la duración de aplicación también depende de la velocidad y del nivel de tránsito diario. Se puede observar que la máxima deformación registrada corresponde al valor del esfuerzo máximo.

Dada la forma tradicional de estructuración de los materiales que conforman el pavimento, la deformabilidad suele decrecer, pues esta interesa sobre todo a niveles profundos. Sin embargo, estos esfuerzos – deformación interesan desde dos puntos de vista, por un lado, las deformaciones excesivas pueden asociarse a estados de falla y por otro, un pavimento se deforma dejando de cumplir sus funciones llegando a conducir esto a un colapso estructural. A continuación, en la figura 11, se ilustra el mecanismo por el cual la formación permanente se va acumulando, teniendo en cuenta de que en los ciclos intermedios se va disminuyendo hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

**FIGURA 11. MECANISMO DE DEFORMACIÓN**



OBTENIDO DE: [HTTPS://UPCOMMONS.UPC.EDU/BITSTREAM/HANDLE/2099.1/3252/50777-10.PDF?SEQUENCE=10&ISALLOWED=Y](https://UPCOMMONS.UPC.EDU/BITSTREAM/HANDLE/2099.1/3252/50777-10.PDF?SEQUENCE=10&ISALLOWED=Y)

El módulo resiliente de las mezclas asfálticas es sensible a la temperatura y a la aplicación de carga. La temperatura indicada para los ensayos es previamente determinada para posterior a esto ser sometida al ciclo de carga y descarga con periodos de reposo. Las muestras realizadas son sometidas a carga diametral por compresión indirecta, es posible hacer ajuste en la duración de los pulsos de carga y temperatura. Sin embargo, se encuentran unas condiciones iniciales ya fijadas como un pulso de carga de 0.1 segundos por un periodo de reposo de 0.9 segundos y la temperatura de 25 °C. (Sánchez & Campagnoli, 2016)

## **7.5 PRINCIPALES DEFECTOS EN REVESTIMIENTOS ASFÁLTICOS**

La condición ambiental, la calidad en los materiales empleados en el proceso, la carga efectiva por eje, la capacidad de la estructura y el volumen de tráfico, son algunos factores que generan una velocidad de deterioro mayor en el pavimento. (Fontes, 2009). La vida útil del pavimento se debe preservar, ya que la funcionalidad de esta es de extrema importancia, por tanto, al presentarse anomalías hace que se disminuya completamente su calidad. Sin embargo, en sus estados iniciales es el momento justo donde deben tomarse las oportunas acciones a corregir, para así brindar y mantener un nivel de servicio proyectado estable.

Las fisuras que se evidencian en la capa asfáltica son consideradas como los defectos más concurrentes en los pavimentos flexibles. El fenómeno de fatiga es el principal responsable de esta causa, ya que esto se da debido a las repeticiones de carga del tráfico sobre la capa. Estas fisuras inician normalmente en la parte inferior del revestimiento y luego se va propagando hasta la superficie del pavimento. (Arao, 2016)

Los mecanismos básicos que generan la aparición de las fisuras anteriormente mencionadas, son los movimientos tanto horizontales como verticales diferenciales que se dan entre las capas granulares y la mezcla asfáltica. Al tenerse movimientos horizontales de la expansión y contracción entre dos capas, se generan especialmente estas fisuras y sobre todo durante el proceso de construcción. (Von Quintus, 2009)

### **7.5.1 Agrietamiento por Fatiga.**

Normalmente una carga simple no ocasiona fisuras en la superficie del pavimento, pero las repeticiones de carga pueden generar agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos de tensión y de cortante, así como las deformaciones, causan la respectiva formación de fisuras, las cuales si se acumulan dan origen a unas de mayor evidencia visual y es a este proceso al que se le conoce como fatiga. (Fontes, 2009)

El rompimiento por fatiga es consecuencia de varios factores, los cuales ocurren de manera alterna con otros, dentro de estos están las cargas repetidas y excesivas, la tensión horizontal en la superficie de la capa, el mal drenaje y las deflexiones generadas en las capas delgadas, que son la causa de un deficiente procedimiento inicial o diseño inadecuado del mismo.

**FIGURA 12. AGRIETAMIENTO POR FATIGA**



**OBTENIDO DE:**

[HTTPS://REPOSITORY.UNIMILITAR.EDU.CO/BITSTREAM/HANDLE/10654/10842/DIAZSUAREZLENNYFARLEY2014.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/10842/DIAZSUAREZLENNYFARLEY2014.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y)

Esta acción de rompimiento, es solo una evidencia de que el pavimento ha sido sobrepasado en el número de repeticiones de carga para el que fue diseñado y su solución es una rehabilitación menor. Pero se debe aclarar, que para prevenir este tipo de inconvenientes se debe tener un adecuado diseño, materiales de calidad, periodos de diseños seleccionados óptimos y rangos elásticos suficientes para soportar la deflexión. (Sánchez & Campagnoli, 2016)

### **7.5.2 Agrietamiento por Temperatura.**

Cuando en la superficie del pavimento se presentan bajas temperaturas, esto genera esfuerzos de tensión y deformaciones relacionadas a la contracción térmica. De manera similar, sucede con altas temperaturas, produciéndose la dilatación.



**FIGURA 13. AGRIETAMIENTO POR TEMPERATURA**



**OBTENIDO DE: INVIAS**

Las fisuras por temperatura aparecen sobre todo en la base granular, y se transmiten a la superficie, las cuales solo se pueden llegar a limitar con capas rígidas estabilizadas bajo la mezcla asfáltica. (Von Quintus, 2009)

### **7.5.3 Ahuellamiento Subrasante.**

La deformación plástica se presenta en ahuellamientos y desplazamientos laterales en las capas asfálticas, generadas por densificación bajo tránsito, por compresión vertical o flujo lateral. Las áreas de los pavimentos donde son más propensos a presentarse este tipo de problemas, son donde se combinan altas temperaturas con la circulación del tráfico vehicular pesado y a baja velocidad, o donde se producen aceleraciones y frenados recurrentes. (Sánchez & Campagnoli, 2016)

**FIGURA 14. AHUELLAMIENTO SUBRASANTE**



**OBTENIDO DE: INVIAS**

En zonas donde se tienen bajas temperaturas, la deformación plástica es prácticamente despreciable si la mezcla esta dosificada de manera adecuada y el asfalto asume parte de los esfuerzos en los contactos entre partículas.

## METODOLOGÍA

La inclusión de plástico tipo PET en las mezclas asfálticas de un pavimento flexible conlleva básicamente a la determinación de las características mecánicas de la mezcla para la evaluación de su aporte estructural, esto implica realizar un estudio comparativo de las propiedades mecánicas de las mezclas con inclusión de plástico tipo PET con relación a las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales.

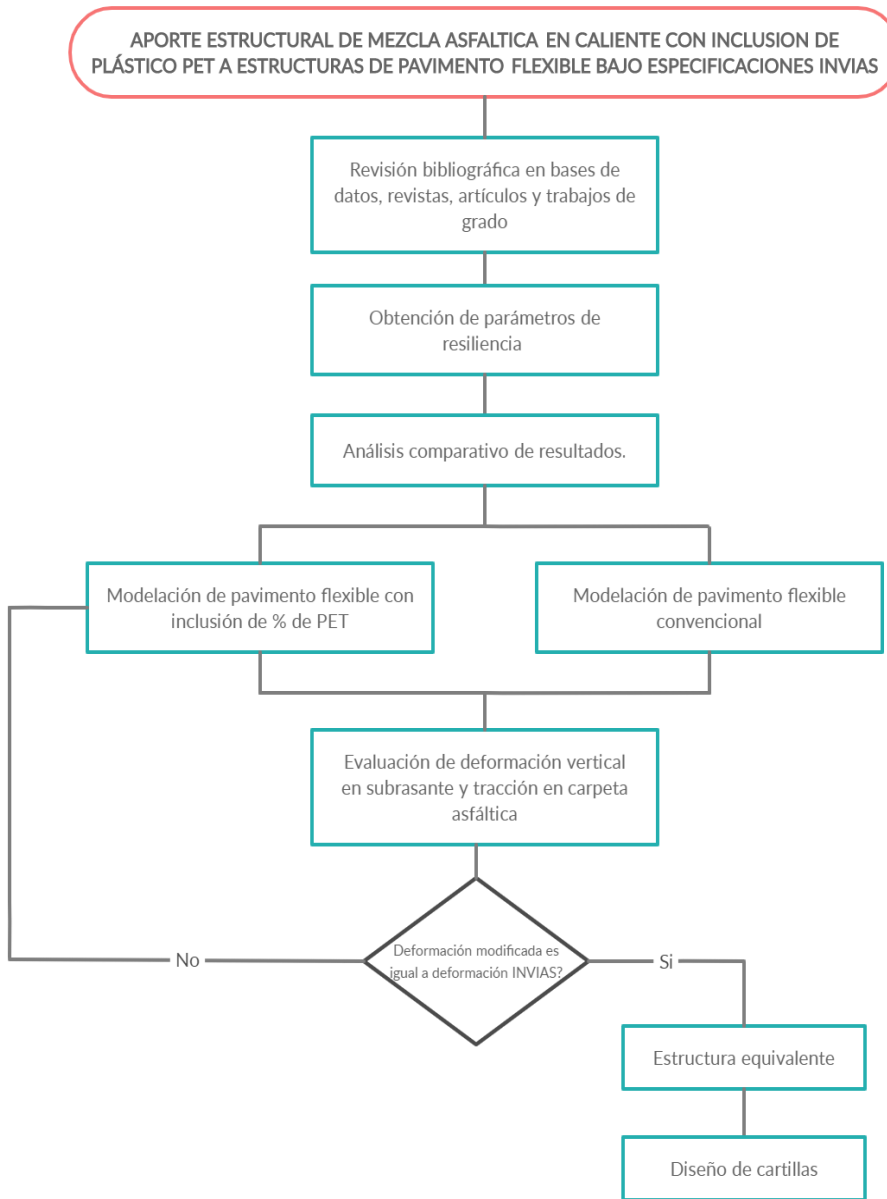
Contemplando que esta investigación es basada con el fin de dar un resultado comparativo que determine el aporte estructural de mezclas asfálticas en caliente con inclusión de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET), estas dan una recopilación de estudios que están ligadas al porcentaje de PET incluido en la mezcla, dando una variación de las propiedades mecánicas que determina el porcentaje óptimo de inclusión.

El conjunto de procedimientos necesarios para determinar el aporte estructural de las mezclas asfálticas en caliente con inclusión de plástico PET en esta investigación, son inicialmente la obtención de los datos necesarios para el análisis elástico multicapa de la mezcla modificada, seguidamente se realizan las gráficas comparativas de las investigaciones correspondientes para determinar el porcentaje óptimo de PET en la mezcla y culminar con la modelación de pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET para bajos volúmenes de tránsito según las especificaciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Con el fin de dar conocimiento a la manera en cómo se abarco la determinación del aporte estructural de las mezclas asfálticas con inclusión de plástico tipo PET y el análisis comparativo con relación a las mezclas convencionales, se desarrolló el flujograma de la figura 15, que describe la metodología del proyecto investigativo que toma como base fundamental la investigación de las características mecánicas de las mezclas asfálticas con inclusión de plástico PET, seguido de un análisis comparativo del mismo en relación a las mezclas convencionales estipuladas en las especificaciones INVIAS, que son apoyadas mediante la modelación de los pavimentos.

La obtención final a la metodología planteada en la figura 15 describe el espesor de la capa de rodadura a partir de los diferentes espesores de base y subbase planteados en la cartilla diseño de pavimentos flexibles para bajos volúmenes de tránsito y vías locales Instituto Nacional de Vías INVIAS.

**FIGURA 15. FLUJOGRAMA DE METODOLOGÍA**



**OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA**

## RESULTADOS

La investigación basada en pavimentos flexibles con inclusión de plástico tipo PET da como resultado varios estudios realizados por diferentes autores, los cuales determinan datos de ensayos que van consignados en la siguiente tabla:

**TABLA 4. TABLA CONSIGNACIÓN DATOS INVESTIGACIÓN**

ESTUDIO	ARTICULO	AUTOR	% PET	Tamaño PET (mm)	Densidad Bulk (gr/cm <sup>3</sup> )	Estabilidad (KN)	Flujo (mm)	Vacíos con aire (%)	Vacíos llenos de asfalto (%)	Vacíos agregado mineral (%)	MR (Mpa)
1	Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo	A. Berrio Álzate (2017)	0	-	2.32	11.61	3.33	6.30	68.00	19.50	8943
			0.5	5.00	2.35	11.14	3.45	5.20	72.21	18.63	10170
			1	0.50 - 2.00	2.39	12.17	3.36	3.40	80.10	17.09	12251
2	Effect of waste plastic bottles on the stiffness and fatigue properties of modified asphalt mixes	A. Modarres; H. Hamedí (2014)	0	-							6000
			2	0.42 - 1.18							6600
			4	0.42 - 1.18							5300
			6	0.42 - 1.18							5000
			8	0.42 - 1.18							5300
			10	0.42 - 1.18							5700
3	Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness	D. Movilla; A. C. Raposeriras; J. Olavarria (2019)	0	-		17.50	2.80	4.80		16.70	3800
			6	2.36 - 5.00		15.00	2.90	4.80		16.80	4000
			10	2.36 - 5.00		16.00	3.50	5.20		17.30	4000
			14	2.36 - 5.00		20.00	3.20	5.80		18.00	3900

	of Hot Asphalt Mixtures		18	2.36 - 5.00		17.50	4.20	5.50		17.80	3200
			22	2.36 - 5.00		15.00	4.30	5.90		18.20	2500
4	Properties of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt Mixes: Dependence on PET Size, PET Content, and Mixing Process	R. Choudhary; A. Kumar; K. Murkute (2018)	0	-	2.38	13.00	3.10	4.00	73.50	15.00	
			2.5	1.18 - 2.36	2.38	13.50	3.00	3.90	74.00	15.25	
			5	1.18 - 2.36	2.38	12.60	2.60	4.20	73.00	15.60	
			7.5	1.18 - 2.36	2.36	11.00	3.10	4.80	71.00	16.30	
5	Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com a Inserção de Polietileno Tereftalato (PET) triturado	Arao, Mieka (2016)	0	-		14.88	7.00	4.20	75.30	17.00	6278
6	Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt	A. Rahman; A. Abdul (2013)	0	-							3250

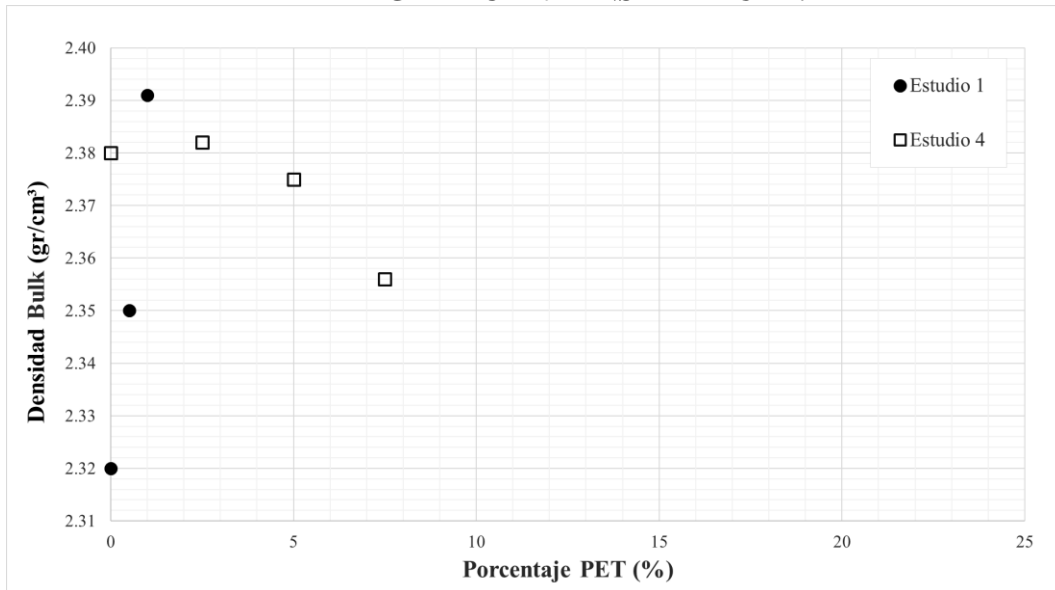
Obtenido de: Recopilación.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta parte del trabajo presenta las gráficas comparativas de los datos obtenidos provenientes de la recopilación de seis artículos basados en el estudio de mezclas asfálticas en caliente con inclusión de varios porcentajes de plástico de Tereftalato de Polietileno (PET) que muestran resultados de cada una de las pruebas ejecutadas.

En principio, se observan los parámetros de densidad de las mezclas con PET respecto a los porcentajes de inclusión del mismo, seguido de la evaluación que hace referencia a la estabilidad Marshall, flujo Marshall, vacíos con aire, vacíos con asfalto, módulo resiliente y deformación. Para finalizar, se desarrolla los diseños de una estructura de pavimento flexible según la cartilla para pavimentos de bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías INVIAS y la estructura de pavimento flexible con inclusión de plástico PET, que permita establecer diferencias técnicas de la mezcla con PET, buscando determinar en forma preliminar su viabilidad.

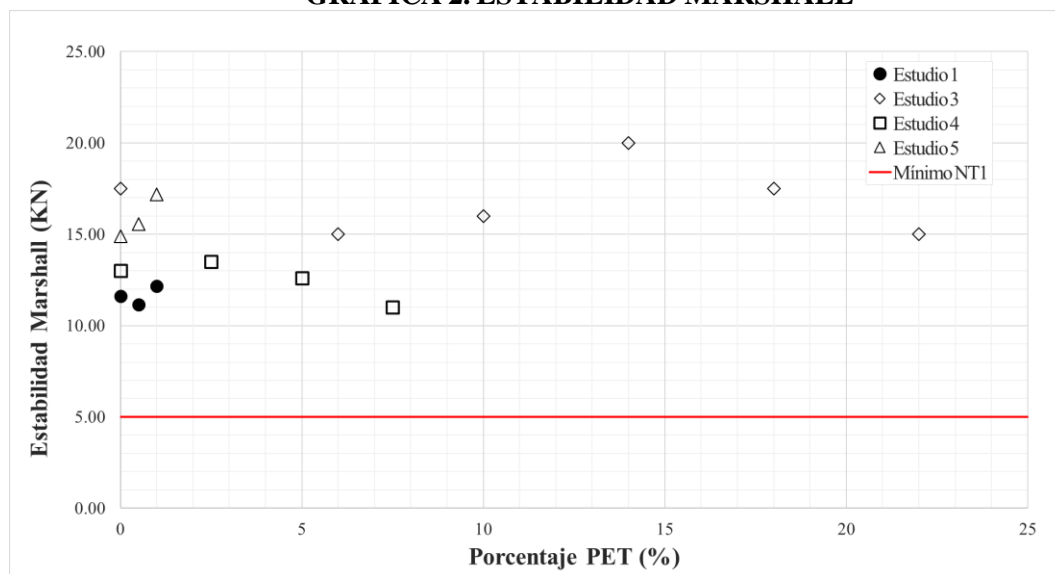
**GRÁFICA 1. DENSIDAD BULK.**



Obtenido de: Fuente propia.

Según la gráfica 1, a partir del primer estudio, se percibe que la densidad Bulk, también conocida como peso unitario, aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de inclusión de plástico PET. De la misma manera se visualiza con el estudio 4 en donde la inclusión del 2.5 % de PET en la mezcla asfáltica da como resultado una densidad de 2.382 gr/cm<sup>3</sup> y disminuye a 2.356 gr/cm<sup>3</sup> con la inclusión de 7.5% de PET. Esto evidencia que la densidad Bulk aumenta a un rango de inclusión de PET de 0.5% a un 2.5% y disminuye parcialmente al aumentar la inclusión.

**GRÁFICA 2. ESTABILIDAD MARSHALL**



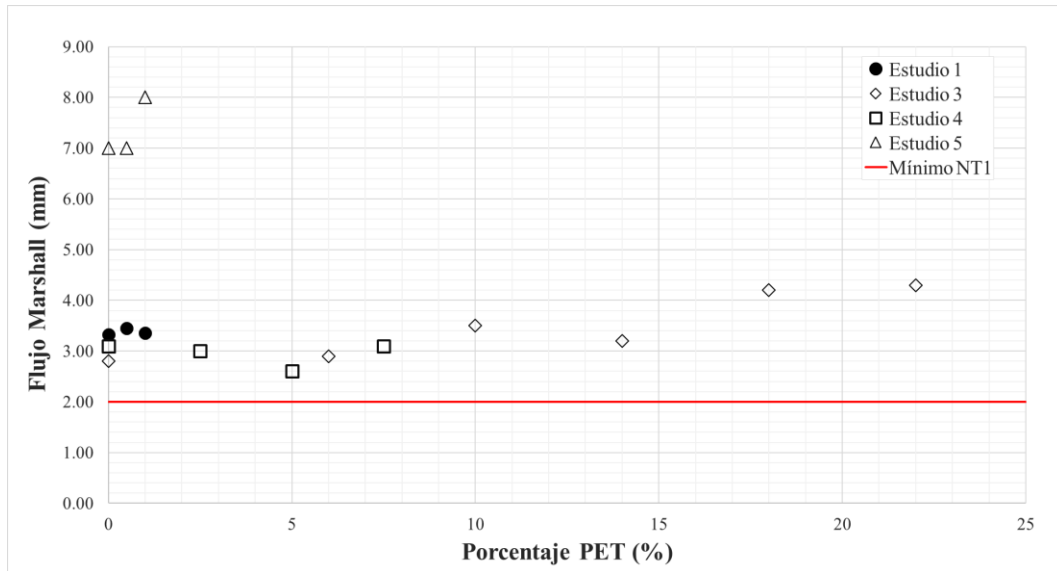
Obtenido de: Fuente propia.

A partir de la gráfica 2, se puede apreciar como la estabilidad Marshall según el estudio 5 se mantiene de una manera considerable comparada con la muestra patrón sin inclusión de plástico PET, denotando una resistencia en las mezclas con porcentajes de inclusión.

Por otro lado, los estudios 1, 3, 4, y 5, superan el rango mínimo de estabilidad Marshall de 5 KN descrito por la línea roja como Mínimo NT1 para mezclas asfálticas en caliente para niveles de tránsito 1, según la tabla 450 – 10 del artículo 450 de las especificaciones INVIAS 2013.

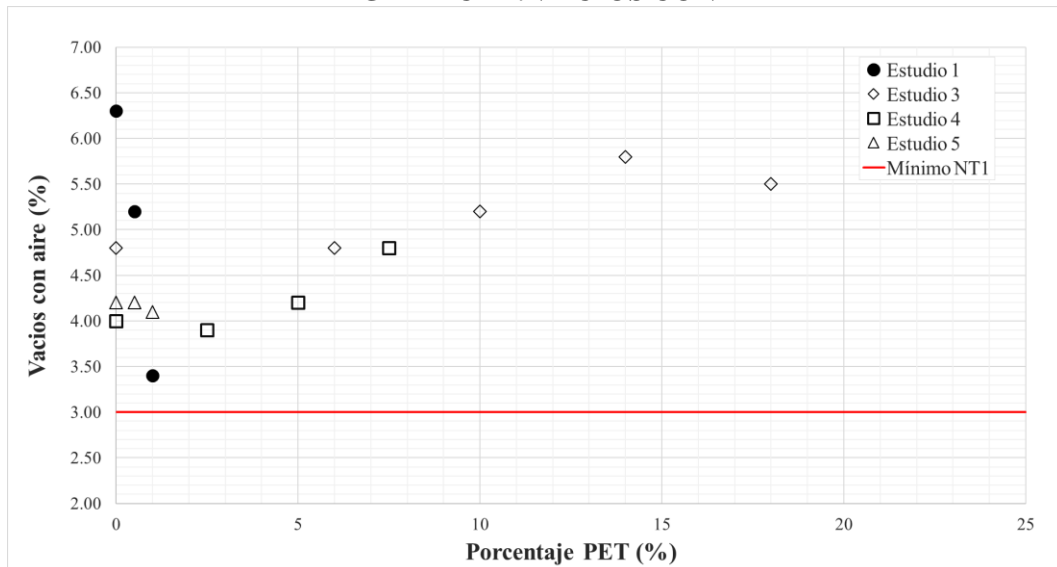
La comparación del flujo Marshall de la gráfica 3 según los estudios 3 y 4 muestran que con el incremento de inclusión de plástico PET a las mezclas de pavimento con respecto a la muestra patrón el flujo se mantiene estable y tiende a aumentar, haciendo que las muestras de asfalto con inclusión de plástico PET se comporten de una manera más dúctil; de igual manera, los estudios 1, 3, 4 y 5 superan el valor mínimo de flujo Marshall descrito por la línea roja de 2 milímetros.

**GRÁFICA 3. FLUJO MARSHALL**



Obtenido de: Fuente propia.

**GRÁFICA 4. VACÍOS CON AIRE**



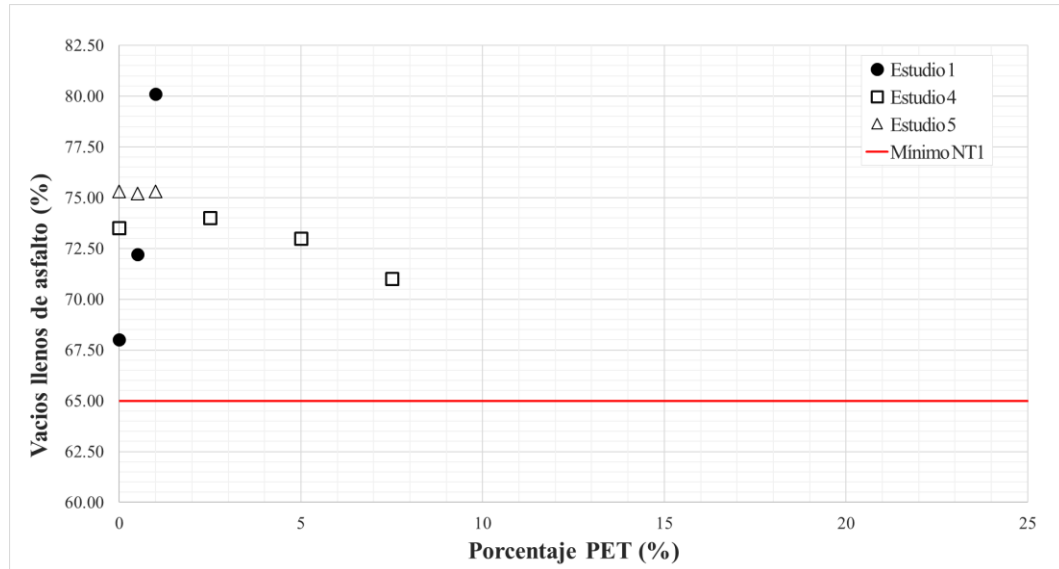
Obtenido de: Fuente propia.

La grafica 4, muestra como el porcentaje de vacíos con aire según el estudio 3 y 4 aumenta con el incremento de la inclusión de porcentajes de plástico PET, esto denota que el tamaño de la partícula de plástico PET y el método de adición, influye en el comportamiento de la mezcla y su durabilidad.



Las mezclas de asfalto superiores al 5% de inclusión de PET en los estudios 3 y 4 podrían hacer posible su uso en capas intermedias para niveles de tránsito 2 según el artículo 450 de INVIAS (2013), en donde estipula un rango mínimo de 4% de vacíos con aire con aire

**GRÁFICA 5. VACÍOS CON ASFALTO**

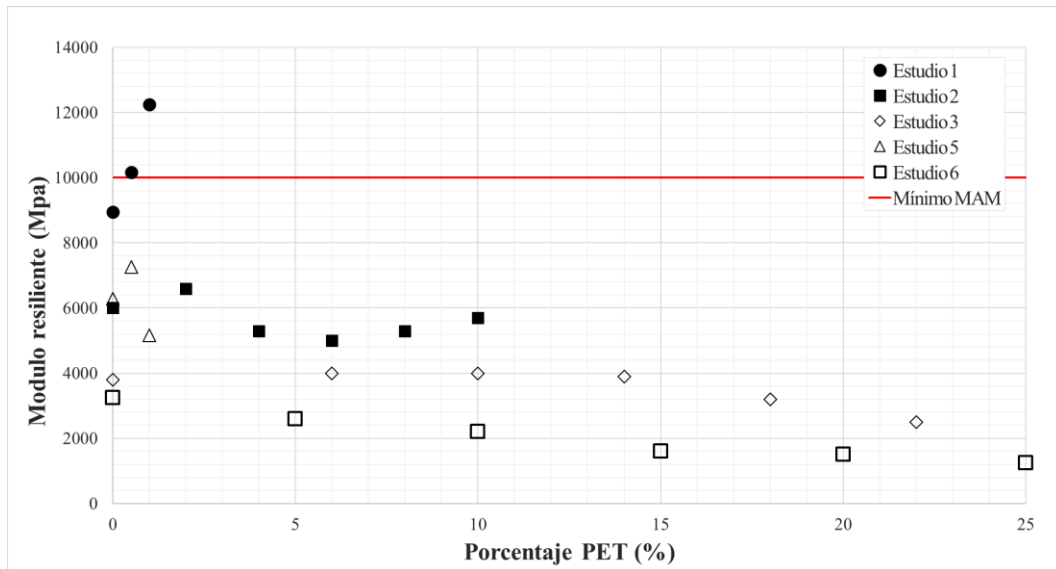


Obtenido de: Fuente propia

Los vacíos llenos de asfalto de los especímenes de mezcla de asfalto con inclusión de plástico PET de los estudios 4 y 5 de la gráfica 5 muestran una tendencia decreciente, a nivel general, esto puede explicarse debido a que el PET se constituye como un agregado más, y debido a su naturaleza impermeable el asfalto no es absorbido, por tanto, el asfalto también lo recubre.

Como se puede apreciar en la gráfica 5, en ninguno de los casos de porcentaje de inclusión de plástico PET, llega al límite inferior de la normatividad INVIAS (2013) artículo 450, que define el límite inferior en un 65,0 % para nivel de tráfico 1

**GRÁFICA 6. MÓDULO RESILIENTE**



Obtenido de: Fuente propia.

Como se puede apreciar, en el estudio 5 y 6 de la gráfica 6, el módulo resiliente disminuye a partir de la inclusión del 2% de plástico PET en referencia a la muestra patrón sin inclusión de PET y sigue decayendo al aumentar los porcentajes de inclusión. Esto denota la rigidez del material al aumentar la inclusión de PET en cada muestra y lo frágil que se tornaría la carpeta asfáltica al aumentar la inclusión.

Los módulos resilientes para las mezclas de asfalto de alto modulo, es decir, mezclas de asfalto que se categorizan por una gran capacidad resistente, lo que permite obtener mejores resultados con menores espesores respecto a las mezclas convencionales, tienen un rango mínimo de modulo resiliente que se describe con la línea roja de 10000 Mpa; valor el cual no es superado por la mayoría de los estudios; lo que sugiere que las mezclas de asfalto con inclusión de plástico PET, requerirán un mayor espesor en la carpeta asfáltica al aumentar la inclusión de PET.

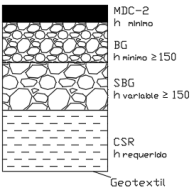
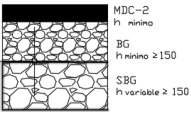
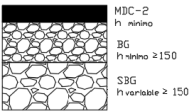
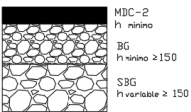
## MODELACIÓN PAVIMENTO

Esta parte del trabajo presenta las modelaciones de los pavimentos flexibles según los parámetros del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías INVIAS y el pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET para el estudio 6 tomando como referencia los datos obtenidos a partir de los porcentajes de inclusión.

### 11.1 PAVIMENTO FLEXIBLE SEGÚN PARÁMETROS INVIAS

La modelación del pavimento flexible se realizó según los parámetros de manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías INVIAS el cual muestra 4 categorías para la estructura tipo 5 según los valores de porcentaje de CBR para la subrasante, para una estructura de pavimento tipo 5 según la figura 16.

**FIGURA 16. ALTERNATIVA ESTRUCTURAL ESTRUCTURA TIPO 5**

CATEGORÍA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO 5
S1 $3 \leq \text{CBR}$	
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	
S4 $\text{CBR} > 10$	

**OBTENIDO DE:** MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO.

Para la modelación de este pavimento se obtienen los módulos resilientes a partir de los coeficientes estructurales  $a_i$  planteados en la tabla 5.1 del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

**FIGURA 17. TABLA 5.1 COEFICIENTES ESTRUCTURALES**

Tipo de capa		Clasificación climática por temperatura	$a_i$
Descripción de la Capa	Nomenclatura		
Mezcla asfáltica densa en caliente tipo 2	MDC-2	Frío	0.44
		Templado	0.41
		Cálido	0.37
Mezcla asfáltica densa en frío tipo 2	MDF-2	Frío	0.40
		Templado	0.37
		Cálido	0.34
Suelo estabilizado con emulsión asfáltica	BEE-3	Todas las categorías	0.14
Suelo estabilizado con cemento Portland	BEC	Todas las categorías	0.14
Base granular	BG	Todas las categorías	0.14
Subbase granular	SBG	Todas las categorías	0.12
Afirmado que cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-1	Todas las categorías	0.08
Afirmado que no cumple la especificación INV. Artículo 311	AFR-2	Todas las categorías	0.06

**OBTENIDO DE:** MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO.

Los módulos resilientes para las capas de base, subbase y carpeta asfáltica se obtienen a partir de las fórmulas de la guía de diseño de pavimentos AASHTO 93, calculados desde los coeficientes estructurales.

a) Módulo resiliente carpeta asfáltica.

El coeficiente estructural  $a_1$  para la mezcla asfáltica según la tabla 5.1 de la figura 17 tomada del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, indica que para clima templado se toma un coeficiente de 0.41.

A partir de la Ecuación 1 se obtiene un módulo resiliente de la mezcla asfáltica de 2,629.730 MPa para un coeficiente estructural de 0.41

$$\ln(Mr_1) = (a_1 + 1.9574) / 0.184$$

$$Mr_1 = 381,410.093 \text{ Psi}$$

$$Mr_1 = 2,629.730 \text{ MPa}$$

$$a_1 = 0,184 * \ln(MR_1) - 1,9547$$

**ECUACIÓN 1.** FÓRMULA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE CAPAS ASFÁLTICAS EN FUNCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN PSI. **OBTENIDO DE:** GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93.

b) Módulo resiliente base granular.

El coeficiente estructural  $a_2$  para la base granular según la tabla 5.1 de la figura 17 tomada del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, indica que para todas las categorías de clima se toma un coeficiente de 0.14.

A partir de la Ecuación 2 se obtiene un módulo resiliente de la base granular de 211.087 MPa para un coeficiente estructural de 0.14

$$\text{Log (Mr}_2) = (a_2 + 0.977) / 0.249$$

$$\text{Mr}_2 = 30,615.670 \text{ Psi}$$

$$\text{Mr}_2 = 211.087 \text{ MPa}$$

$$a_2 = 0,249 * \log(MR_2) - 0,977$$

**ECUACIÓN 2.** FÓRMULA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA BASE GRANULAR EN FUNCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN PSI. **OBTENIDO DE:** GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93

c) Módulo resiliente sub base granular.

El coeficiente estructural  $a_3$  para la sub base granular según la tabla 5.1 de la figura 17 tomada del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, indica que para todas las categorías de clima se toma un coeficiente de 0.12.

A partir de la Ecuación 3 se obtiene un módulo resiliente de la base granular de 115.661 MPa para un coeficiente estructural de 0.12

$$\text{Log (Mr}_3) = (a_3 + 0.839) / 0.227$$

$$\text{Mr}_3 = 16,775.273 \text{ Psi}$$

$$\text{Mr}_3 = 115.661 \text{ MPa}$$

$$a_3 = 0,227 * \log(MR_3) - 0,839$$

**ECUACIÓN 3.** FÓRMULA PARA DETERMINAR EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA SUB BASE GRANULAR EN FUNCIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE EN PSI. **OBTENIDO DE:** GUÍA DE DISEÑO DE PAVIMENTOS AASHTO 93

d) Módulo resiliente subrasante.

Los módulos resilientes para las cuatro subrasantes de CBR con valor de 1%, 3%, 5% y 10% sugeridas en la figura 16 se calculan a partir de la formula descrita en la Ecuación 4 tomada del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.

$$\mathbf{Mr\ CBR\ 1\% = 17.616\ MPa}$$

$$\mathbf{Mr\ CBR\ 3\% = 35.585\ MPa}$$

$$\mathbf{Mr\ CBR\ 5\% = 49.345\ MPa}$$

$$\mathbf{Mr\ CBR\ 10\% = 76.897\ MPa}$$

$$M_r = 2555 \times (CBR)^{0.64}$$

**ECUACIÓN 4. FÓRMULA CORRELACIÓN PROPUESTA POR LA AASHTO PARA LA DETERMINACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE EN PSI. OBTENIDO DE: MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO.**

e) Coeficientes de Poisson.

Los coeficientes de Poisson para las capas de concreto asfáltico, base granular, subbase granular y subrasante son tomadas de la figura 22.

**FIGURA 18. TABLA 4. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN LA ESTRUCTURA.**

Material	Módulo (Mpa)	Poisson
Concreto asfáltico	687-1500	0.35
Base Granular	245	0.40
Sub base	147	0.40
subrasante	50	0.50

**OBTENIDO DE: REVISTA DE INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN VOL. 30 No. 3 2015.**

f) Espesores mínimos.

Los espesores de las capas del pavimento son tomados como los espesores mínimos establecidos en la figura 16 de la alternativa estructural tipo 5 y la figura 23 del espesor mínimo establecido por el Método AASHTO-93 en función de la categoría de tráfico propuesta por el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.

**FIGURA 19. ESPESOR MÍNIMO PARA CARPETA ASFÁLTICA ESTABLECIDO POR EL MÉTODO AASHTO-93 EN FUNCIÓN DE LA CATEGORÍA DE TRÁFICO.**

Categoría de tráfico	Rango de ejes de 80 kN en el carril de diseño	$h_{min}$ (mm)
T1	< 150.000	50
T2	150.000 - 500.000	75

**OBTENIDO DE:** MANUAL DE DISEÑO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS PARA VÍAS CON BAJOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO.

Se obtiene el valor de espesor mínimo de 75 mm para la carpeta asfáltica con un nivel de tránsito 2 y el valor de 150 mm para las capas de base granular y subbase granular.

**TABLA 5. TABLA CONSIGNACIÓN DATOS MODELACIÓN**

<b>Datos modelación pavimento flexible según parámetros INVIAS</b>				
Capa	Espesor recomendado (mm)	Coefficiente estructural (ai)	Módulo resiliente (Mpa)	Coefficiente de Poisson
Carpeta asfáltica	75	0.41	2629.730	0.35
Base granular	150	0.14	211.087	0.40
Subbase granular	150	0.12	115.661	0.40
Subrasante CBR 1%	-	-	17.616	0.50
Subrasante CBR 3%	-	-	35.585	0.50
Subrasante CBR 5%	-	-	49.345	0.50
Subrasante CBR 10%	-	-	76.897	0.50

**Obtenido de:** Fuente propia.

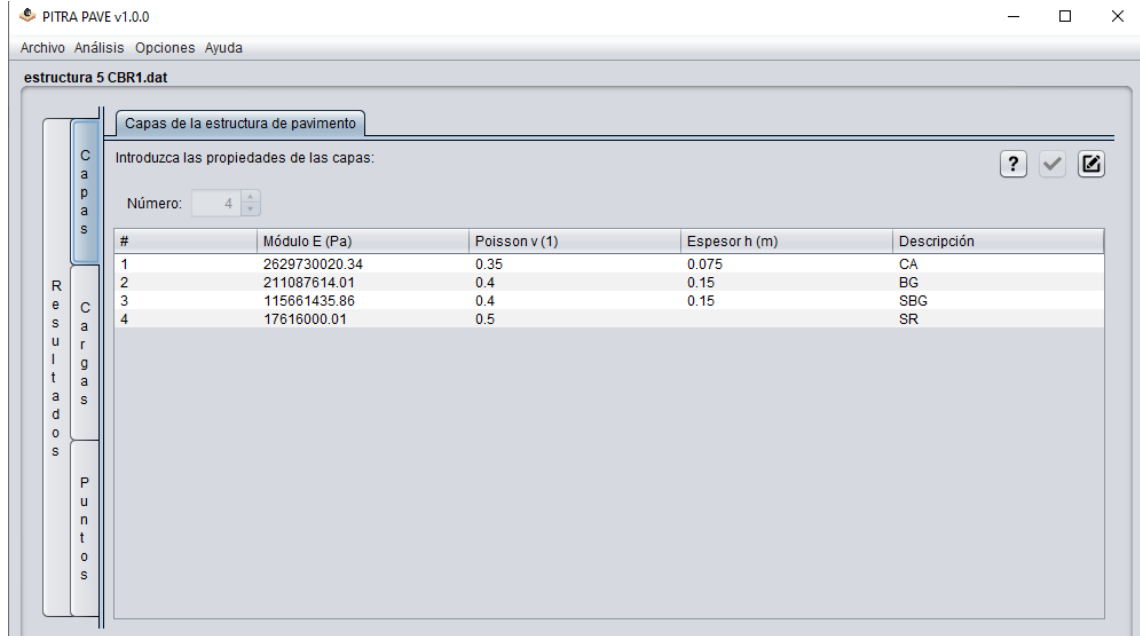
La tabla 5, consigna los datos anterior mente calculados a partir de las figuras y las ecuaciones tomadas de las diferentes bibliografías.

g) Modelación software PITRA PAVE.

Las modelaciones del pavimento flexible se realizan a partir de los valores en porcentaje de CBR para la subrasantes según las estructuras tipo 5 de la figura 16 tomada del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, los módulos resilientes calculados a partir de las fórmulas para determinar el coeficiente estructural en función del módulo resiliente tomado de la guía de diseño de pavimentos AASTHO 93 y los espesores mínimos de la carpeta asfáltica tomado del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.

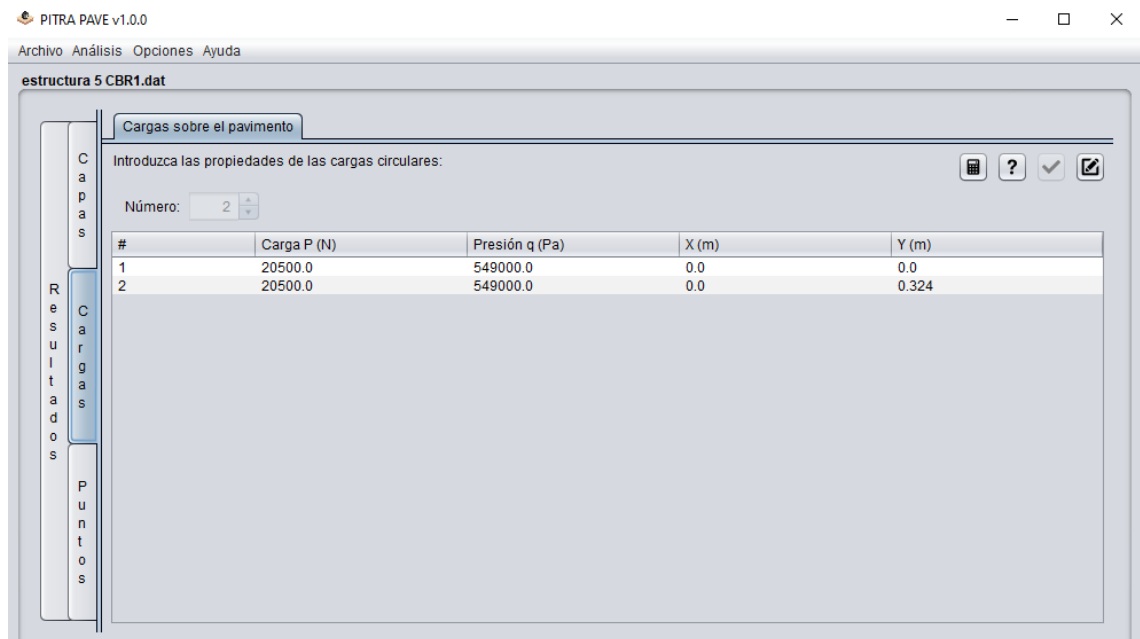
- CBR 1%

**FIGURA 20. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

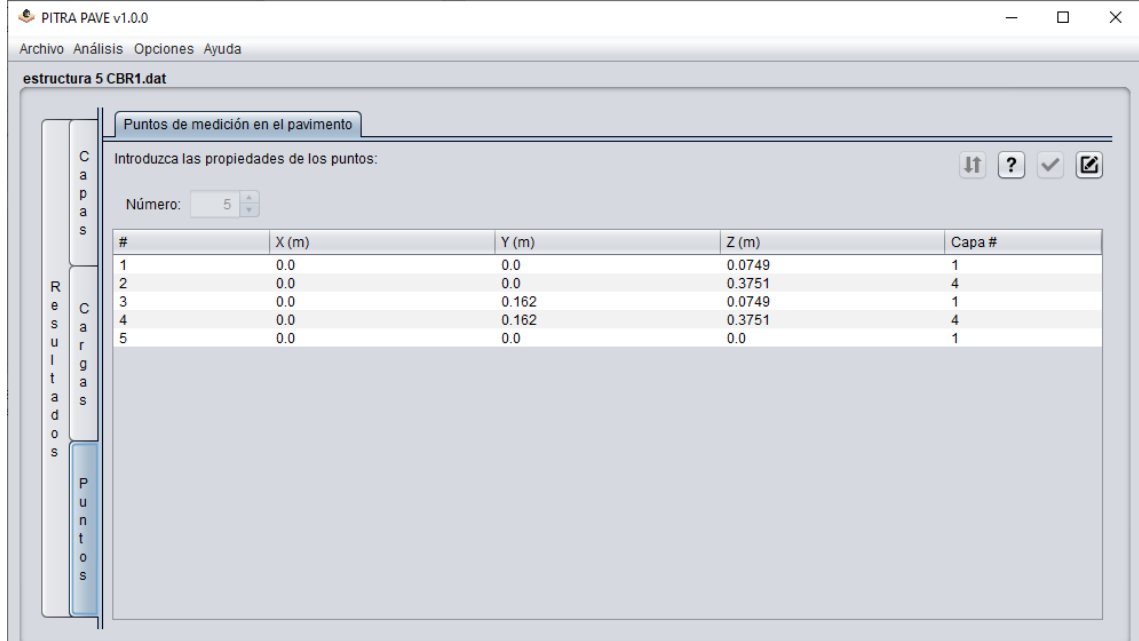
**FIGURA 21. MODELACIÓN PITRA PAVE - CARGAS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

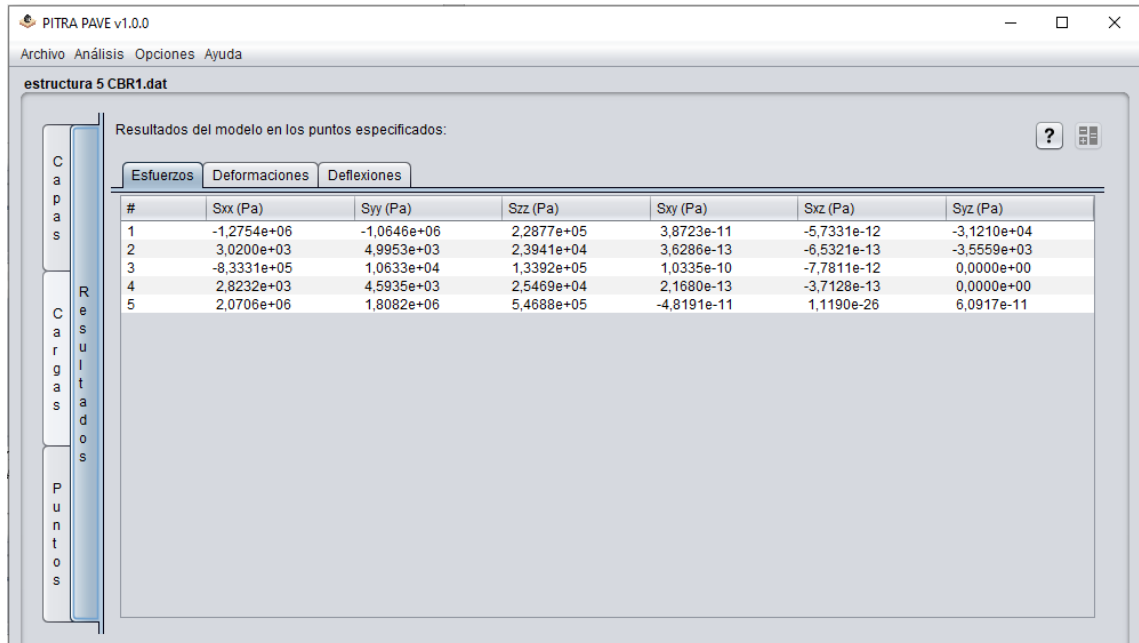


**FIGURA 22. MODELACIÓN PITRA PAVE - PUNTOS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

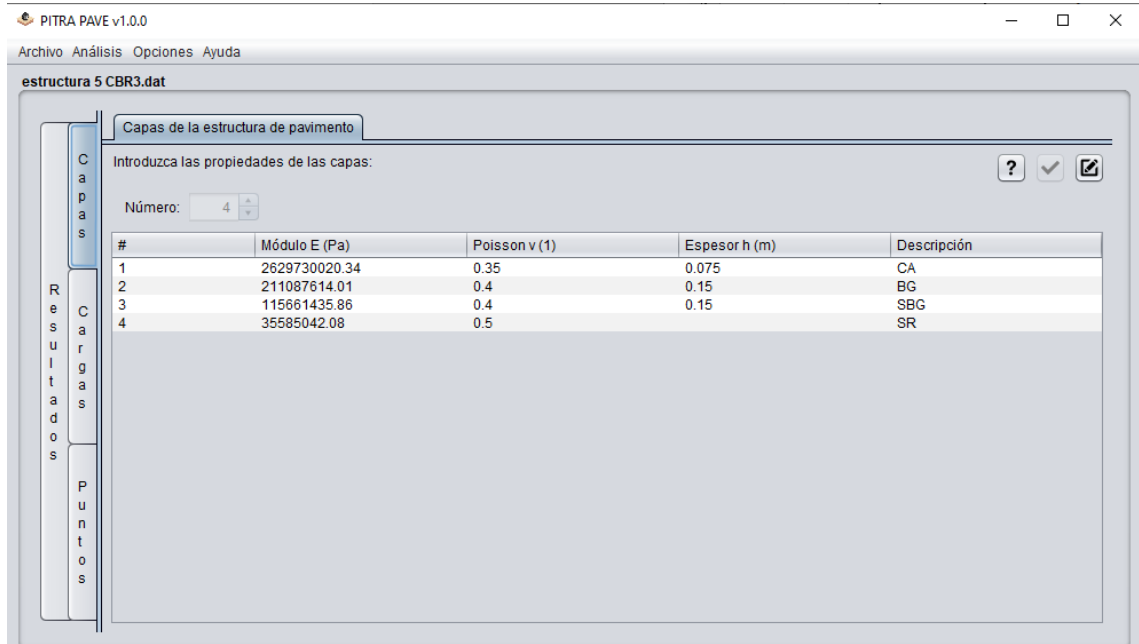
**FIGURA 23. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 1%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

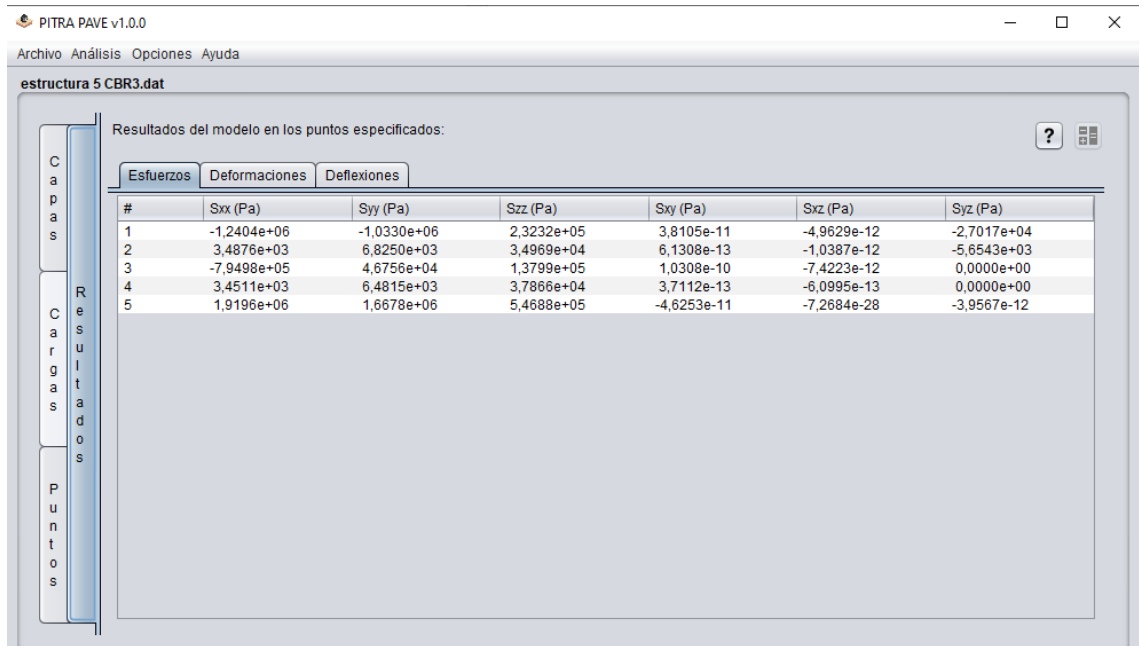
- CBR 3%

**FIGURA 24. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 3%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

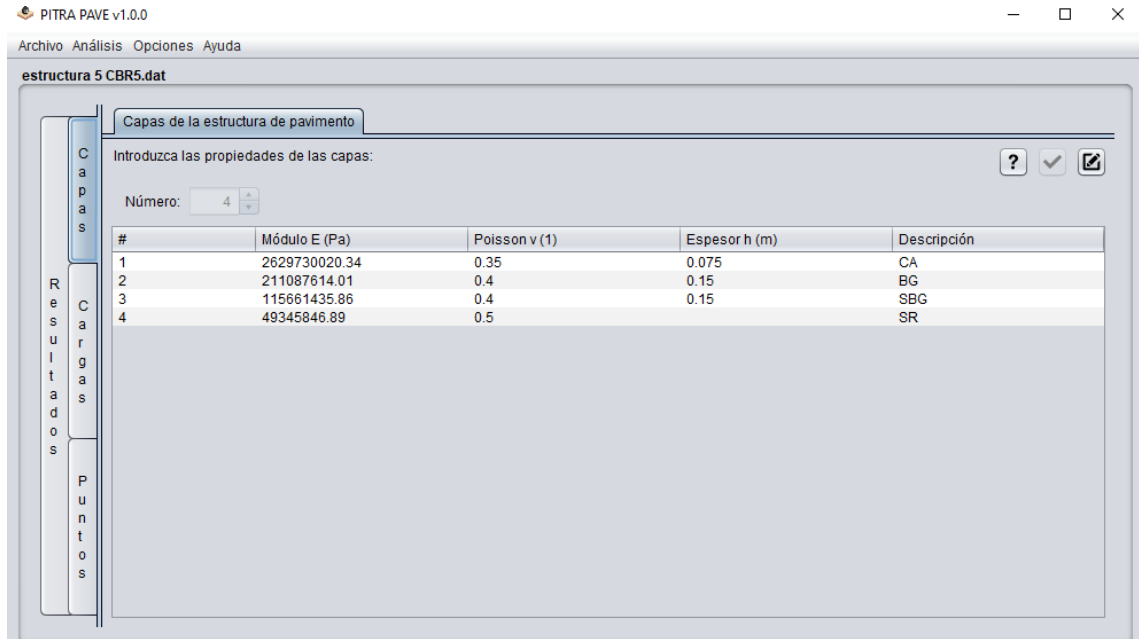
**FIGURA 25. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 3%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

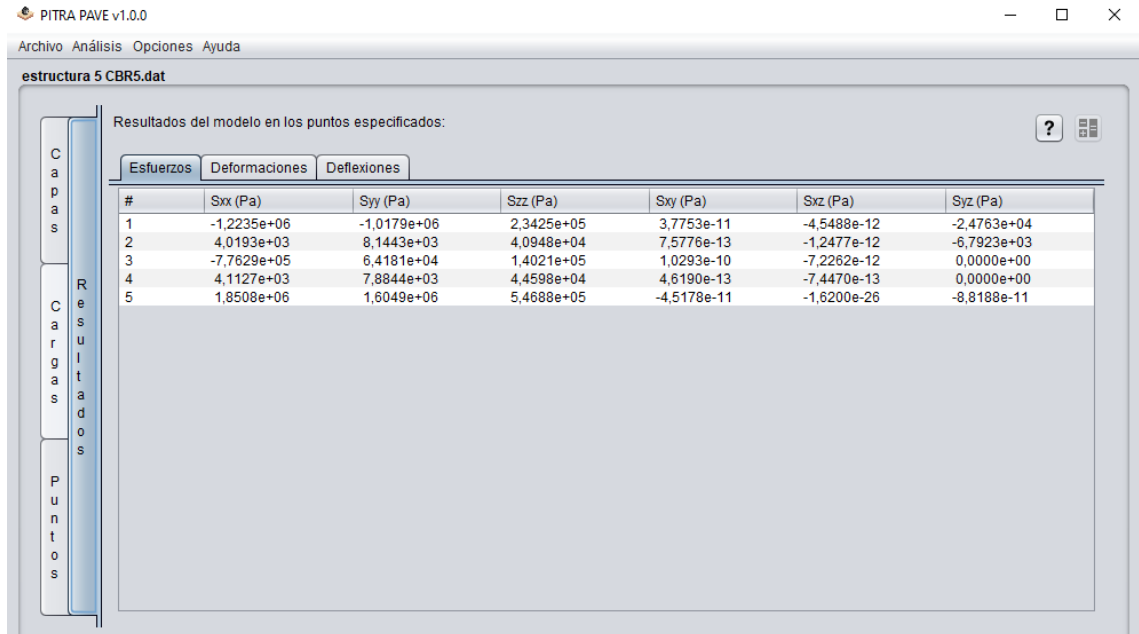
- CBR 5%

**FIGURA 26. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 5%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

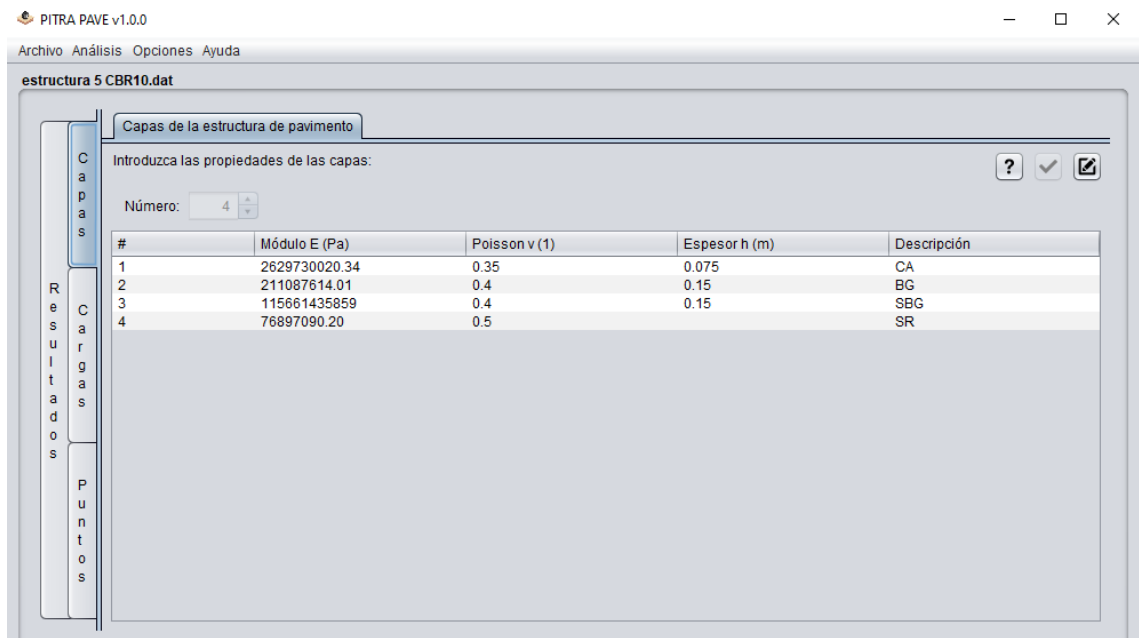
**FIGURA 27. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 5%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA

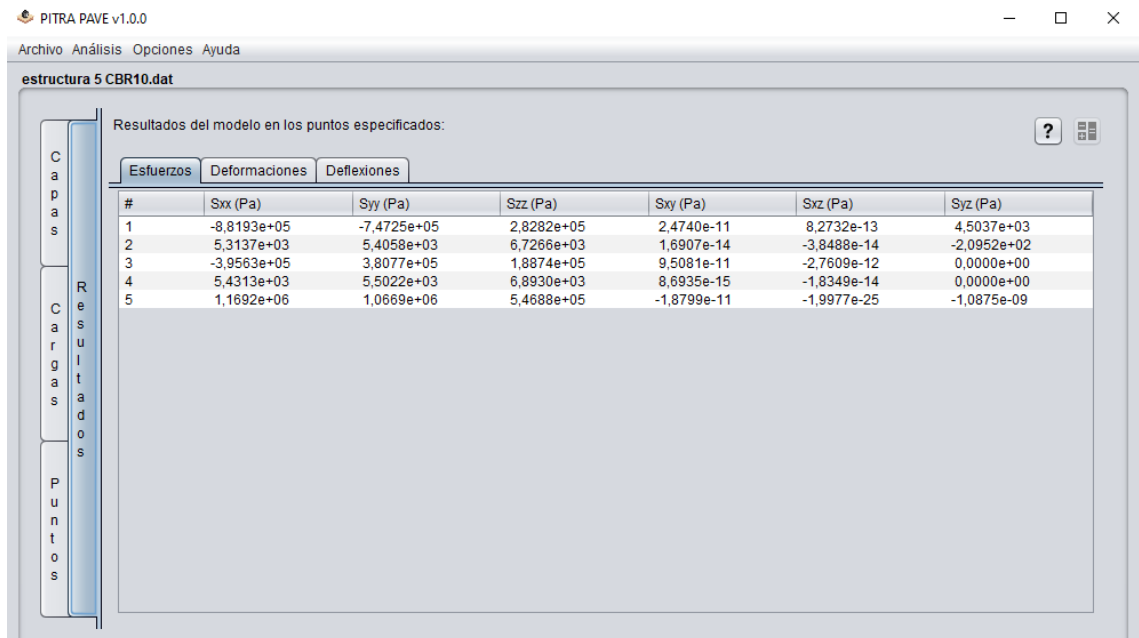
- CBR 10%

**FIGURA 28. MODELACIÓN PITRA PAVE - CAPAS - ESTRUCTURA 5 CBR 10%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

**FIGURA 29. MODELACIÓN PITRA PAVE - RESULTADOS - ESTRUCTURA 5 CBR 10%**



OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

## 11.2 PAVIMENTO FLEXIBLE CON INCLUSIÓN DE PLÁSTICO TIPO PET

La modelación del pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET se realiza según los parámetros obtenidos a partir del porcentaje de inclusión de plástico tipo PET y los parámetros de manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías INVIAS el cual muestra 4 categorías para la estructura tipo 5 según los valores de porcentaje de CBR para la subrasante.

En este caso se modelará las estructuras de pavimento para el Estudio 6 (Green pavement using recycled polyethylene terephthalate (PET) as partial fine aggregate replacement in modified asphalt.), analizadas desde 4 tipos de CBR para la subrasante (Figura 16) planteadas en el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del Instituto Nacional de Vías INVIAS; además se mantendrán los espesores mínimos y los módulos resilientes para la base y la subbase granular planteados en la modelación INVIAS.

### a) Módulo resiliente para carpeta asfáltica con inclusión de PET

Los módulos resilientes obtenidos del estudio 6, según la inclusión de plástico tipo PET, son consignados en la tabla 6.

**TABLA 6. DATOS ESTUDIO 6.**

ESTUDIO	ARTICULO	AUTOR	% PET	Tamaño PET (mm)	MR (Mpa)	MR (Psi)
6	Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt	A. Rahman; A. Abdul	0	-	3250	471373.5
			5	3.00	2600	377098.8
			10	3.00	2200	319083.6
			15	3.00	1600	232060.8
			20	3.00	1500	217557
			25	3.00	1250	181297.5

Obtenido de: Fuente propia.

### b) Coeficientes de Poisson.

El coeficiente de Poisson para la capa de concreto asfáltico con inclusión de plástico tipo PET es de 0.30, según la figura 30.

**FIGURA 30. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CILINDRO CON PET CBR 10%**

<b>Nombre</b>	Hormigón Asfáltico con PET al 30 %	
<b>General</b>	Densidad de masa	1.61 g/cm <sup>3</sup>
	Límite de elasticidad	6000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	No requerida
<b>Tensión</b>	Módulo de Young	7.73 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	2.97308 GPa
<b>Nombre(s) de pieza</b>	Cemento Asfáltico con PET	

**OBTENIDO DE:** ANÁLISIS FÍSICO – MECÁNICO DE MORTEROS ASFÁLTICOS COMPUESTOS A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS.

c) Modelación software PITRA PAVE.

Las modelaciones del pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET se realizan a partir de los valores en porcentaje de CBR para la subrasantes según las estructuras tipo 5 de la figura 16 tomada del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, los módulos resilientes obtenidos del estudio 6 y los calculados para la base y subbase granular; además de los espesores mínimos de la carpeta asfáltica tomado del Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.

Los resultados de las modelaciones tomados, son los valores del esfuerzo vertical en la subrasante ( $S_{zz}$ ) y la deformación a tracción en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica ( $E_{xx}$ ), teniendo en cuenta que los valores positivos en los resultados se entienden como valores de compresión y los valores negativos como valores a tracción.

**TABLA 7. MODELACIÓN 0% Y 5% DE PET**

CBR	0 % PET		5 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )
	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>
<b>CBR 1%</b>	0.0232	-350.4	0.0240	-375.0
<b>CBR 3%</b>	0.0339	-340.0	0.0350	-366.4
<b>CBR 5%</b>	0.0397	-335.0	0.0410	-362.3
<b>CBR 10%</b>	0.0482	-328.2	0.0497	-357.0

**Obtenido de:** Fuente propia.

**TABLA 8. MODELACIÓN 10% Y 15% DE PET**

CBR	10 % PET		15 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )
	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>
<b>CBR 1%</b>	0.0246	-392.0	0.0257	-418.6
<b>CBR 3%</b>	0.0358	-385.2	0.0374	-417.0
<b>CBR 5%</b>	0.0419	-382.0	0.0437	-416.0
<b>CBR 10%</b>	0.0508	-377.6	0.0528	-414.4

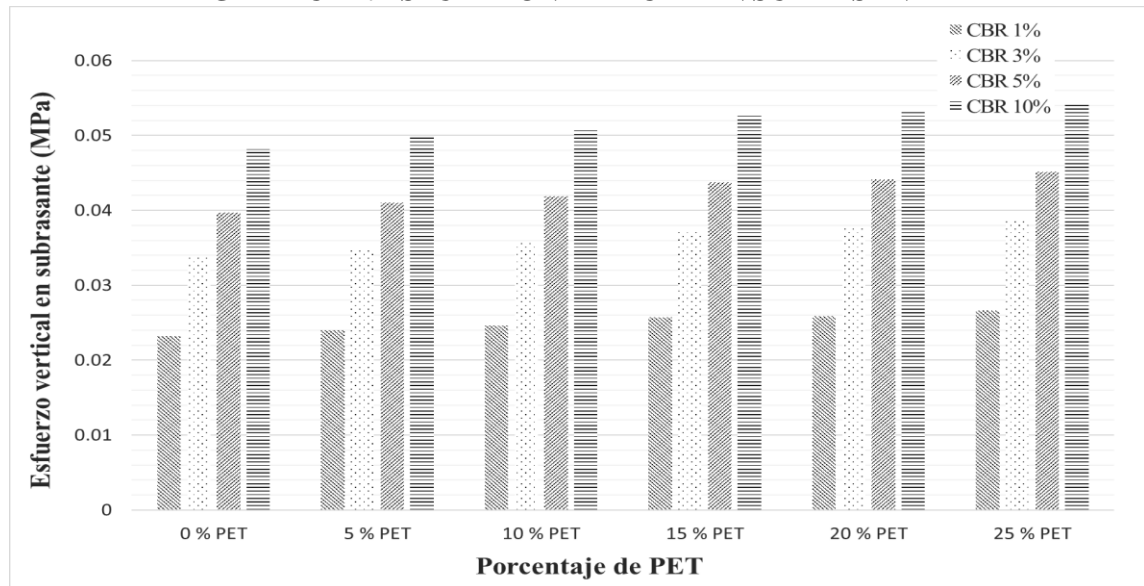
Obtenido de: Fuente propia.

**TABLA 9. MODELACIÓN 20 % Y 25% DE PET**

CBR	20 % PET		25 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Deformación Tracción en carpeta asfáltica ( $\mu\epsilon$ )
	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>	<b>Szz</b>	<b>Exx</b>
<b>CBR 1%</b>	0.0259	-423.0	0.0266	-433.0
<b>CBR 3%</b>	0.0377	-423.0	0.0386	-436.3
<b>CBR 5%</b>	0.0441	-422.1	0.0451	-438.0
<b>CBR 10%</b>	0.0532	-421.2	0.0544	-438.8

Obtenido de: Fuente propia.

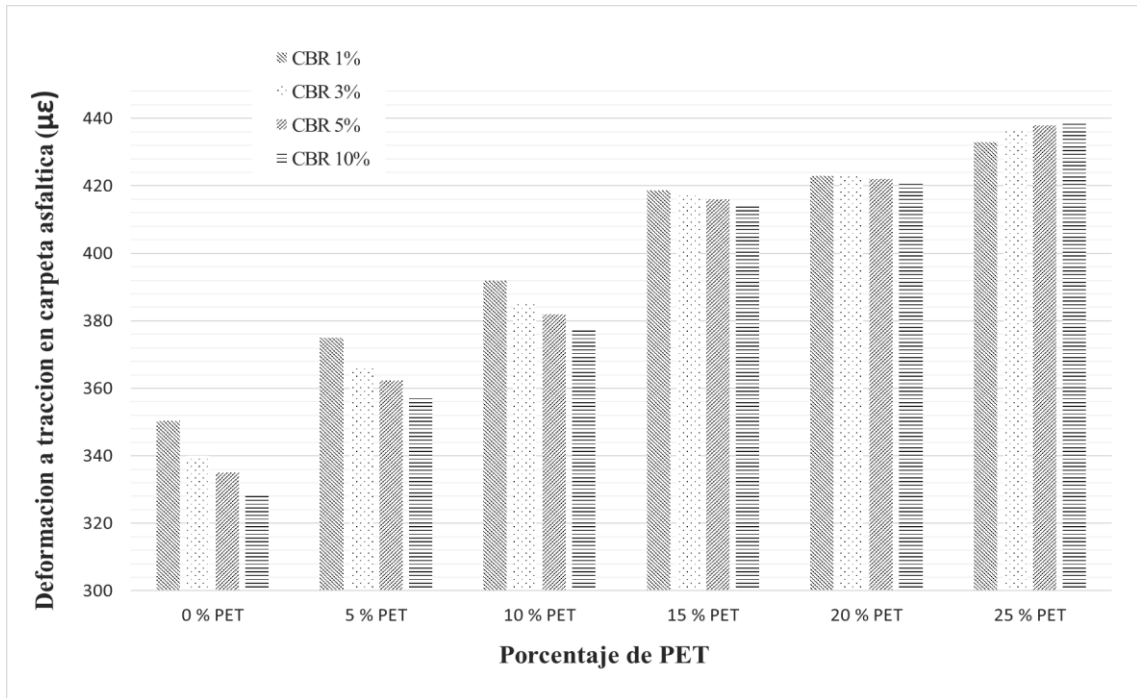
**GRÁFICA 7. ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE**



Obtenido de: Fuente propia

A partir de las tablas de modelación 7, 8 y 9, se obtuvo la gráfica 7, que muestra el incremento del esfuerzo vertical sobre la subrasante, debido al aumento del porcentaje de inclusión de PET en la mezcla asfáltica; de igual manera se observa que el incremento del esfuerzo es proporcional al incremento del porcentaje de CBR.

**GRÁFICA 8. DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA**



Obtenido de: Fuente propia

De igual manera que la gráfica 7, la gráfica 8 se construyó a partir de las tablas de modelación 7, 8 y 9, en donde se muestra la deformación a tracción en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica, mostrando que a medida que aumenta el porcentaje de CBR la deformación a tracción disminuye parcialmente; pero al aumentar el porcentaje de inclusión de plástico tipo PET en la mezcla asfáltica, la deformación a tracción aumenta.

### 11.3 EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE

La estructura de pavimento al ser sometida una serie de cargas sobre la superficie produce una serie de deformaciones y tensiones, las deformaciones producen desplazamientos verticales que por lo general están asociados al estado de falla de la subrasante.

Esta parte del trabajo evalúa el esfuerzo vertical sobre la subrasante en los pavimentos flexibles con inclusión de plástico tipo PET respecto a los pavimentos flexibles del instituto nacional de vías INVIAS; con el fin de garantizar un mismo valor de esfuerzo en todos los



porcentajes de inclusión, manteniendo un mismo nivel de servicio respecto a los pavimentos planteados por el INVIAS desde los valores de CBR requeridos.

a) Inclusión 0% PET

**TABLA 10. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 0% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		0 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
	<b>Szz</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Szz</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>CBR 1%</b>	0.0239	75	0.0232	75
<b>CBR 3%</b>	0.0350	75	0.0339	75
<b>CBR 5%</b>	0.0409	75	0.0397	75
<b>CBR 10%</b>	0.0496	75	0.0482	75

Obtenido de: Fuente propia.

Según la tabla 10 no es necesario aumentar la altura de la carpeta asfáltica en ningún caso de CBR de la subrasante, ya que el esfuerzo vertical del pavimento con inclusión del 0% PET, no supera el esfuerzo vertical de las estructuras del INVIAS.

b) Inclusión 5% PET

**TABLA 11. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 5% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		5 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
	<b>Szz</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Szz</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>CBR 1%</b>	0.0239	75	0.0239	76
<b>CBR 3%</b>	0.0350	75	0.0349	76
<b>CBR 5%</b>	0.0409	75	0.0408	76
<b>CBR 10%</b>	0.0496	75	0.0495	76

Obtenido de: Fuente propia.

A partir de la tabla 11, se puede apreciar como el valor del espesor de la carpeta asfáltica debe aumentar a 0.076 metros para evitar que el valor del esfuerzo vertical sea mayor que el valor del INVIAS.

c) Inclusión 10 % PET

**TABLA 12. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 10% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		10 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
	Szz	Espesor (mm)	Szz	Espesor (mm)
CBR 1%	0.0239	75	0.0238	82
CBR 3%	0.0350	75	0.0348	82
CBR 5%	0.0409	75	0.0408	82
CBR 10%	0.0496	75	0.0494	82

Obtenido de: Fuente propia.

Para lograr que los esfuerzos verticales sobre la subrasante del estudio 6 con inclusión del 10 % de PET no superen los esfuerzos de las estructuras del INVIAS, se debe aumentar la altura de la capa de rodadura en 7 mm.

d) Inclusión 15 % PET

**TABLA 13. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 15% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		15 % PET	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
	Szz	Espesor (mm)	Szz	Espesor (mm)
CBR 1%	0.0239	75	0.0236	110
CBR 3%	0.0350	75	0.0349	96
CBR 5%	0.0409	75	0.0408	96
CBR 10%	0.0496	75	0.0493	96

Obtenido de: Fuente propia.

Según la tabla 13 es necesario aumentar la altura de la carpeta asfáltica en 21 mm como mínimo en todos los casos del CBR de la subrasante, ya que el esfuerzo vertical del pavimento con inclusión del 15% PET supera el esfuerzo vertical de las estructuras del INVIAS.

e) Inclusión 20 % PET

**TABLA 14. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 20% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)		Carpeta asfáltica	
	Szz	Espesor (mm)	Szz	Espesor (mm)
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
<b>CBR 1%</b>	0.0239	75	0.0239	108
<b>CBR 3%</b>	0.0350	75	0.0349	100
<b>CBR 5%</b>	0.0409	75	0.0408	100
<b>CBR 10%</b>	0.0496	75	0.0492	100

Obtenido de: Fuente propia.

La inclusión de 20% de PET en una capa de rodadura asfáltica requiere que la altura de la carpeta sea mínima 0.10 metros con el fin de evitar que los esfuerzos verticales lleguen a la subrasante.

f) Inclusión 25 % PET

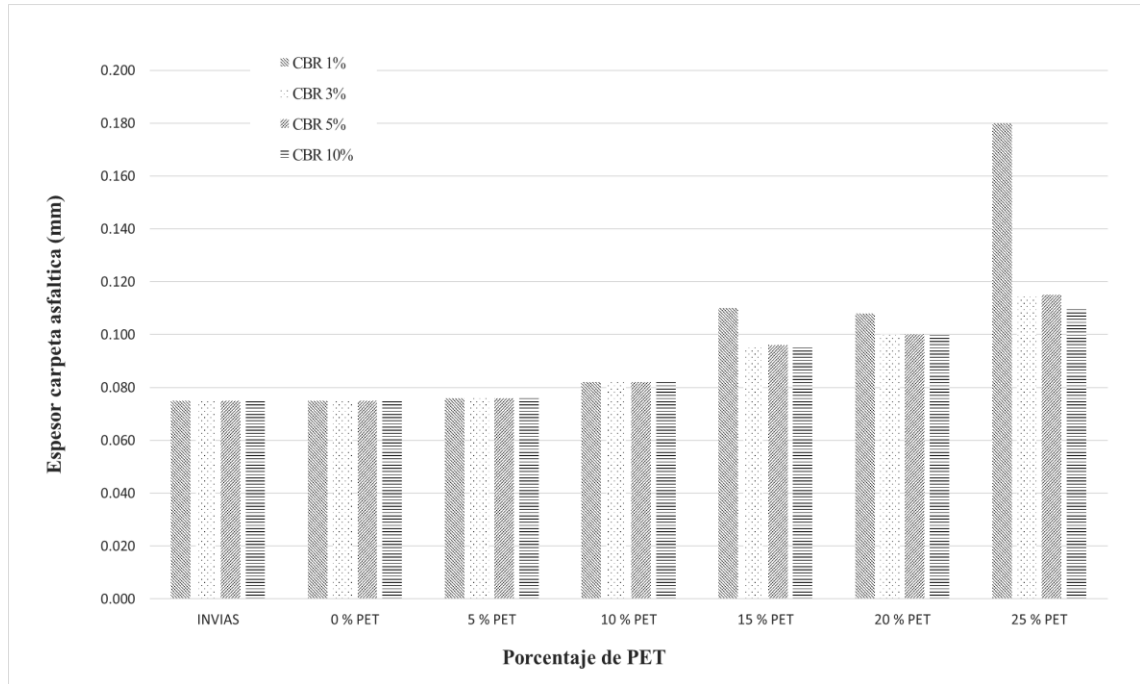
**TABLA 15. EVALUACIÓN ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE CON INCLUSIÓN DE 25% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)		Carpeta asfáltica	
	Szz	Espesor (mm)	Szz	Espesor (mm)
	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica	Esfuerzo vertical en subrasante (MPa)	Carpeta asfáltica
<b>CBR 1%</b>	0.0239	75	0.0239	180
<b>CBR 3%</b>	0.0350	75	0.0349	115
<b>CBR 5%</b>	0.0409	75	0.0406	115
<b>CBR 10%</b>	0.0496	75	0.0493	110

Obtenido de: Fuente propia.

A partir de los valores de la tabla 15, se denota que es necesario aumentar la altura de la carpeta asfáltica, tanto así que su altura mínima de esta inclusión de PET requeriría 35 mm más de altura.

**GRÁFICA 9. ESPESOR DE CARPETA ASFÁLTICA A PARTIR DE ESFUERZO VERTICAL EN SUBRASANTE**



Obtenido de: Fuente propia

A partir de la gráfica 9, se puede denotar que el espesor de la carpeta asfáltica cambia considerablemente a partir del 10% de inclusión de PET para poder mantener el mismo nivel de esfuerzo vertical en la subrasante; pero a partir del 15% de inclusión de PET y manteniendo un valor menor o igual de esfuerzo vertical en la subrasante los espesores de la carpeta asfáltica tienden a subir hasta una diferencia aproximada de 35 milímetros más de espesor.

#### 11.4 EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN - CARPETA ASFÁLTICA

La deformación a tracción en la carpeta asfáltica es uno de los principales mecanismos que se intentan controlar en el diseño de pavimentos; este fenómeno ocurre en la mayoría de las capas ligadas causando posteriormente fatiga por cargas cíclicas.

En este espacio se evaluará la deformación a tracción en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica del pavimento flexible con inclusión de plástico tipo PET respecto a los pavimentos flexibles del instituto nacional de vías INVIAS; con el fin de garantizar un menor valor de deformación en todos los porcentajes de inclusión, manteniendo un mismo nivel de servicio respecto a los pavimentos planteados por el INVIAS desde los valores de CBR requeridos.

a) Inclusión 0% PET

**TABLA 16. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 0% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		0 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (με)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (με)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-350.4	75
CBR 3%	-365.1	75	-339.9	75
CBR 5%	-360.9	75	-334.9	75
CBR 10%	-355.4	75	-328.3	75

Obtenido de: Fuente propia.

La tabla 16, indica que la altura de la carpeta asfáltica permanecerá igual debido a que la deformación a tracción del estudio 6, con 0% de inclusión de PET, no supera en ninguno de los casos de porcentaje de CBR el valor de deformación a tracción de las estructuras del Instituto nacional de vías INVIAS.

b) Inclusión 5% PET

**TABLA 17. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 5% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		5 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (με)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (με)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-361.4	76
CBR 3%	-365.1	75	-353.2	76
CBR 5%	-360.9	75	-349.3	76
CBR 10%	-355.4	75	-344.0	76

Obtenido de: Fuente propia.

De acuerdo a la tabla 17, los valores de alturas de la carpeta asfáltica para el estudio 6, con un 5% de inclusión de plástico tipo PET, aumentan en 1 milímetro para satisfacer un valor menor o igual en la deformación a tracción respecto a las estructuras tipo 5 planteadas por el INVIAS en el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.

c) Inclusión 10% PET

**TABLA 18. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 10% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		10 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-303.3	82
CBR 3%	-365.1	75	-298.9	82
CBR 5%	-360.9	75	-296.7	82
CBR 10%	-355.4	75	-293.7	82

Obtenido de: Fuente propia.

Los valores de altura de la carpeta asfáltica para el 10% de inclusión de PET en el estudio 6, mostrado en la tabla 18, dejan ver un aumento de 7 mm en su espesor comparado con los espesores de mínimos de carpeta asfáltica planteados en el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, para conservar un valor aceptable de deformación a tracción.

d) Inclusión 15% PET

**TABLA 19. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 15% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		15 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-116.7	110
CBR 3%	-365.1	75	-199.0	96
CBR 5%	-360.9	75	-200.3	96
CBR 10%	-355.4	75	-201.8	96

Obtenido de: Fuente propia.

Los valores de la diferencia en alturas de la carpeta asfáltica en la tabla 19, muestra que con el aumento del porcentaje de inclusión de plástico PET en una mezcla asfáltica, los espesores de la carpeta tienden a aumentar, esto debido a la ductilidad y al método de inclusión del PET.

e) Inclusión 20% PET

**TABLA 20. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 20% DE PET**

CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		20 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-127.9	108
CBR 3%	-365.1	75	-176.4	100
CBR 5%	-360.9	75	-178.4	100
CBR 10%	-355.4	75	-181.0	100

Obtenido de: Fuente propia.

La inclusión de 20% de PET en una capa de rodadura asfáltica, requiere que la altura de la carpeta sea mínimo 0.10 metros, con el fin de lograr que la deformación a tracción sea igual o menor a la deformación impuesta para las estructuras tipo 5 del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.

f) Inclusión 25% PET

**TABLA 21. EVALUACIÓN DEFORMACIÓN A TRACCIÓN EN CARPETA ASFÁLTICA CON 25% DE PET**

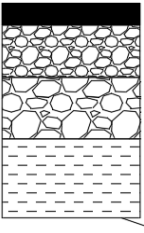
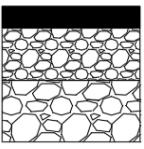
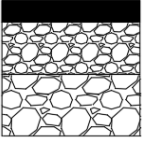
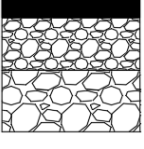
CBR	INVIAS		ESTUDIO 6	
	Estructura 5		25 % PET	
	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica	Deformación a Tracción en carpeta asfáltica (μɛ)	Carpeta asfáltica
	Exx	Espesor (mm)	Exx	Espesor (mm)
CBR 1%	-373.7	75	-007.3	180
CBR 3%	-365.1	75	-113.3	115
CBR 5%	-360.9	75	-121.3	115
CBR 10%	-355.4	75	-142.2	110

Obtenido de: Fuente propia.

## 11.5 CARTILLA ESTRUCTURAS EQUIVALENTES

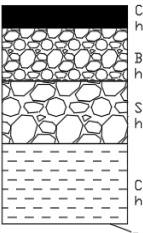
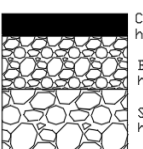
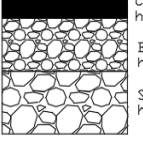
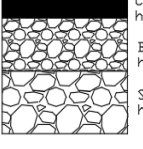
Las estructuras de pavimento flexible para Estudio 6, imponen que, para su uso se debe respetar los valores mínimos en los espesores de carpeta asfáltica, con el fin de conservar un valor aceptable para la deformación a tracción en la parte inferior de la carpeta y evitar que los valores de esfuerzo vertical en la subrasante sean superiores a los recomendados por el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito del INVIAS en su estructura típica número 5.

**FIGURA 31. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 5% DE PLÁSTICO PET**

5% DE INCLUSION DE PLASTICO TIPO PET	
CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO 5
S1 $3 \leq \text{CBR}$	 <p>CA 5% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 76</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math> CSR <math>h_{\text{requerido}}</math> Geotextil</p>
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	 <p>CA 5% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 76</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	 <p>CA 5% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 76</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>
S4 $\text{CBR} > 10$	 <p>CA 5% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 76</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>

OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

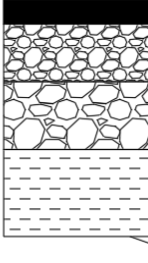
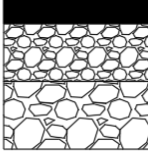
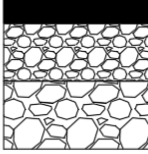
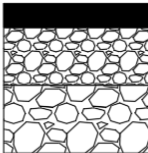
**FIGURA 32. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 10% DE PLÁSTICO PET**

10% DE INCLUSION DE PLASTICO TIPO PET	
CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO 5
S1 $3 \leq \text{CBR}$	 <p>CA 10% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 82</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math> CSR <math>h_{\text{requerido}}</math> Geotextil</p>
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	 <p>CA 10% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 82</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	 <p>CA 10% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 82</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>
S4 $\text{CBR} > 10$	 <p>CA 10% PET <math>h_{\text{mínimo}} \geq 82</math> BG <math>h_{\text{mínimo}} \geq 150</math> SBG <math>h_{\text{variable}} \geq 150</math></p>

OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

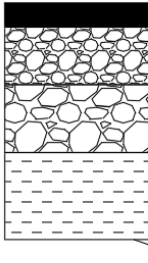
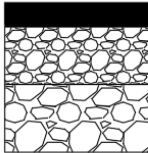
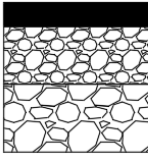
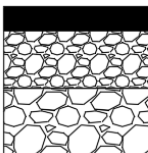


**FIGURA 33. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 15% DE PLÁSTICO PET**

15% DE INCLUSION DE PLASTICO TIPO PET	
CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO
S1 $3 \leq \text{CBR}$	 <p>CA 15% PET h mínimo <math>\geq 110</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math> CSR h requerido Geotextil</p>
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	 <p>CA 15% PET h mínimo <math>\geq 96</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	 <p>CA 15% PET h mínimo <math>\geq 96</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S4 $\text{CBR} > 10$	 <p>CA 15% PET h mínimo <math>\geq 96</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>

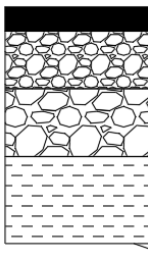
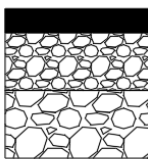
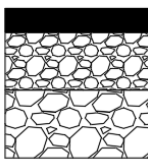
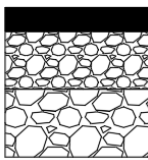
OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

**FIGURA 34. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 20% DE PLÁSTICO PET**

20% DE INCLUSION DE PLASTICO TIPO PET	
CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO
S1 $3 \leq \text{CBR}$	 <p>CA 20% PET h mínimo <math>\geq 108</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math> CSR h requerido Geotextil</p>
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	 <p>CA 20% PET h mínimo <math>\geq 100</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	 <p>CA 20% PET h mínimo <math>\geq 100</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S4 $\text{CBR} > 10$	 <p>CA 20% PET h mínimo <math>\geq 100</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>

OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

**FIGURA 35. CARTILLA PAVIMENTO FLEXIBLE CON 25% DE PLÁSTICO PET**

25% DE INCLUSION DE PLASTICO TIPO PET	
CATEGORIA DE SUBRASANTE	ESTRUCTURAS TIPO
	5
S1 $3 \leq \text{CBR}$	 <p>CA 25% PET h mínimo <math>\geq 180</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math> CSR h requerido Geotextil</p>
S2 $3 < \text{CBR} \leq 5$	 <p>CA 25% PET h mínimo <math>\geq 115</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S3 $5 < \text{CBR} \leq 10$	 <p>CA 25% PET h mínimo <math>\geq 115</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>
S4 $\text{CBR} > 10$	 <p>CA 25% PET h mínimo <math>\geq 110</math> BG h mínimo <math>\geq 150</math> SBG h variable <math>\geq 150</math></p>

OBTENIDO DE: FUENTE PROPIA.

## CONCLUSIONES

- De acuerdo a la recopilación de la información de los estudios ya ejecutados, se evidenció que de acuerdo a la densidad de Bulk la inclusión óptima de PET se encuentra entre 0.5% a 2.5% obteniendo un resultado de densidad aproximadamente de 2.382 gr/cm<sup>3</sup>. También es importante mencionar que, al aumentar el porcentaje de inclusión de PET al valor anteriormente citado, la densidad disminuye parcialmente.
- La estabilidad de Marshall demostró que únicamente en el estudio 5 se logra mantener acorde a la muestra patrón, denotando de esta manera resistencia en la mezcla. Adicionalmente, se enfatiza que los demás estudios superan el rango mínimo de Marshall el cual tiene un valor de 5 KN para mezclas asfálticas en caliente para niveles de tránsito 1 bajo especificaciones INVIAS.
- Respecto a los vacíos de aire, estos tienden a aumentar en relación al incremento del porcentaje de PET, por lo tanto, la influencia del tamaño de partículas y el método de adición son primordiales para generar un comportamiento estable en la mezcla. Mientras que los vacíos llenos de asfaltos presentan decrecimiento a nivel general a medida que se aumenta el porcentaje de PET, sin embargo, cabe aclarar que ninguno de los casos de estudio llega al límite inferior de la normatividad INVIAS el cual está definido en un 65% para nivel de tráfico 1.
- Se concluyó que el módulo resiliente muestra disminución a partir del porcentaje de inclusión de PET del 2% en comparación a la muestra patrón la cual no tiene porcentaje de PET.
- Las modelaciones realizadas del pavimentos flexible con inclusión de plástico tipo PET, se realizaron a partir de los valores de porcentaje de CBR para las subrasantes según las estructuras tipo 5 tomadas del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de bajos volúmenes de tránsito del INVIAS, donde inicialmente se evaluó el esfuerzo vertical en la subrasante y se mostró que a partir del 5% de inclusión de PET el valor de la altura de la carpeta asfáltica debía empezar a aumentar hasta posiblemente 35.0 mm, esto con el fin de garantizar un mismo valor de esfuerzo y mantener el nivel de servicio requerido.
- La deformación a tracción muestra variaciones en el espesor de la carpeta asfáltica entre 1.0 mm y 100.0 mm, estas con el propósito de que la deformación sea igual o menor a la impuesta para las estructuras tipo 5 del manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías de bajos volúmenes de tránsito del INVIAS.
- La capacidad estructural de un pavimento flexible adecuado a las especificaciones INVIAS, respecto a los pavimentos flexibles con inclusión de plástico tipo PET

adicionado mediante vía seca, son totalmente superiores; esto comprobado desde los módulos resilientes de los materiales, lo hacen más factibles a ser usados; al compararlos, el espesor de la carpeta asfáltica en las mezclas de asfalto con inclusión de plástico tipo PET deben aumentar hasta en 35 milímetros su espesor, dependiendo del porcentaje de inclusión de PET, para lograr mantener menor o igual el valor de esfuerzos verticales en la subrasante y deformación vertical en las fibras inferiores de la carpeta asfáltica.

## ANEXOS

CBR	INVIAS			ESTUDIO 1		
	Estructura 5			0 % PET		
	Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
	Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
CBR 1%	23941	-0,00037374	-0,00026553	19419,000	-0,00023171	-0,00015932
CBR 3%	34969	-0,00036513	-0,00025864	28400,000	-0,00021854	-0,00014773
CBR 5%	40948	-0,00036094	-0,00025543	33322,000	-0,00021240	-0,00014249
CBR 10%	49631	-0,00035537	-0,00025132	40535,000	-0,00020445	-0,00013585

ESTUDIO 1			ESTUDIO 1		
0.5 % PET			1 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
18896	-0,00021750	-0,00014979	18118	-0,00019769	0,000
27632	-0,00020452	-0,00013831	26493	-0,00018513	0,000
32425	-0,00019848	-0,00013311	31097	-0,00017930	0,000
39457	-0,00019067	-0,00012653	37860	-0,00017176	0,000

CBR	INVIAS			ESTUDIO 2		
	Estructura 5			0 % PET		
	Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
	Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
CBR 1%	23941	-0,00037374	-0,00026553	20974,000	-0,00027796	-0,00019125
CBR 3%	34969	-0,00036513	-0,00025864	30682,000	-0,00026482	-0,00017993
CBR 5%	40948	-0,00036094	-0,00025543	35985,000	-0,00025866	-0,00017480
CBR 10%	49631	-0,00035537	-0,00025132	43753,000	-0,00025064	-0,00016829

ESTUDIO 2			ESTUDIO 2		
2 % PET			4 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
20612	-0,00026669	-0,00018331	21437	-0,00029275	0,000
30151	-0,00025345	-0,00017184	31360	-0,00027985	0,000
35365	-0,00024725	-0,00016664	36775	-0,00027379	0,000
42992	-0,00023919	-0,00016005	11682	-0,00026589	0,000

ESTUDIO 2			ESTUDIO 2		
6 % PET			8 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
21652	-0,00029972	-0,00020695	21437	-0,00029275	-0,00020186
31674	-0,00028698	-0,00019609	31360	-0,00027985	-0,00019083
37140	-0,00028098	-0,00019116	36775	-0,00027379	-0,00018582
45119	-0,00027316	-0,00018490	11682	-0,00026589	-0,00017947

ESTUDIO 2		
10 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy
21167	-0,00028406	-0,00019561
30964	-0,00027101	-0,00018439
36313	-0,00026488	-0,00017930
44130	-0,00025691	-0,00017285

CBR	INVIAS			ESTUDIO 3		
	Estructura 5			0 % PET		
	Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
	Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
CBR 1%	23941	-0,00037374	-0,00026553	22643,000	-0,00033233	-0,00023158
CBR 3%	34969	-0,00036513	-0,00025864	33113,000	-0,00032079	-0,00022194
CBR 5%	40948	-0,00036094	-0,00025543	38811,000	-0,00031531	-0,00021753
CBR 10%	49631	-0,00035537	-0,00025132	47112,000	-0,00030812	-0,00021192

ESTUDIO 3			ESTUDIO 3		
6 % PET			10 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
22460	-0,00032629	-0,00022690	22460	-0,00032629	0,000
32849	-0,00031447	-0,00021698	32849	-0,00031447	0,000
38505	-0,00030886	-0,00021245	38505	-0,00030886	0,000
46748	-0,00030152	-0,00020669	46748	-0,00030152	0,000

ESTUDIO 3			ESTUDIO 3		
14 % PET			18 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
22551	-0,00032928	-0,00022921	23251	-0,00035219	-0,00024740
32980	-0,00031759	-0,00021942	33988	-0,00034180	-0,00023887
38656	-0,00031204	-0,00021495	39822	-0,00033682	-0,00023494
46928	-0,00030477	-0,00020926	48308	-0,00033027	-0,00022994

ESTUDIO 3		
22 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy
24119	-0,00037903	-0,00027016
35219	-0,00037096	-0,00026377
41235	-0,00036701	-0,00026078
49965	-0,00036175	-0,00025693

CBR	INVIAS			ESTUDIO 5		
	Estructura 5			0 % PET		
	Esfuerzo vertical (Pa)	Deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	deformación Tracción	
	Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
CBR 1%	23941	-0,00037374	-0,00026553	20803,000	-0,00027259	-0,00018746
CBR 3%	34969	-0,00036513	-0,00025864	30431,000	-0,00025940	-0,00017606
CBR 5%	40948	-0,00036094	-0,00025543	35692,000	-0,00025321	-0,00017089
CBR 10%	49631	-0,00035537	-0,00025132	43384,000	-0,00024517	-0,00016433

ESTUDIO 5			ESTUDIO 5		
0.5 % PET			1 % PET		
Esfuerzo vertical (Pa)	deformación Tracción		Esfuerzo vertical (Pa)	deformación Tracción	
Szz	Exx	Eyy	Szz	Exx	Eyy
20249	-0,00025568	-0,00017566	21536	-0,00029595	0,000
29619	-0,00024240	-0,00016410	31504	-0,00028312	0,000
34744	-0,00023619	-0,00015886	36943	-0,00019215	0,000
42245	-0,00022813	-0,00015223	44884	-0,00026922	0,000

## BIBLIOGRAFÍA

- Abdul, W.M. y Affendy, M. (2016). Characterisation of Recycled Polyethylene Terephthalate as Partial Fine Aggregate Replacement Properties and Behaviour of Asphalt Mixtures for Road Pavements [Caracterización del Tereftalato de Polietileno Reciclado como Reemplazante Parcial del Agregado]. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(6).
- Al-Taher, H.M. (2015). Reinforcement of Asphalt Concrete by Polyester Fibers to Improve Flexural Bending Fatigue Resistance. *Journal of Engineering*, 1(21), 115-130. Recuperado de: <https://www.iasj.net/iasj?func=fulltext&aId=95637>
- Arao, M. (2016). Comportamiento Mecánico de Misturas Asfálticas con una Inserción de Polietileno Tereftalato (PET) Triturado (Doctoral dissertation). Rio de Janeiro: PUC-Rio.
- BBC News Mundo. (2017). “Hay tantos residuos de plástico en el mundo que podrían cubrir un país como Argentina”: la advertencia de un grupo científicos sobre la contaminación que acecha al nuestro planeta - BBC News Mundo. Recuperado 25 de septiembre de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-40664725>
- Brown, S. F. (1994). “Behaviour of Layered Systems Under Repetitive Loading”. XIII ICSMFE. New Delhi, India, pp. 321 – 325
- Castro, W.A., Rondón, H.A. & Barrero, J.C. (2015). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. *Revista ingeniería*, 1(21), 7-18. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/inge/v21n1/v21n1a01.pdf>
- Earnest, M. D. (2015). Performance Characteristics of Polyethylene Terephthalate (PET) Modified Asphalt [Características de Rendimiento del Asfalto Modificado con Tereftalato de Polietileno (PET)] (tesis de maestría). Georgia Southern University, Georgia, Estados Unidos (EEUU)
- Fuentes-Audén, C., Sandoval, J. A., Jerez, A. N., Martínez-Boza, F. J., & Partal, P. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing*, v27, 1005-1012.
- García Sánchez, A. O. (2017). Ingeniería Básica de una Planta de Producción de Tereftalato de Polietileno (trabajo de fin de grado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- González, A.E., Pérez, A.J & Vergara, H.L. (2016). Viabilidad técnica de obtención de un diseño de mezcla asfáltica adicionada con 3.8% de fibra de PET, que cumpla con la normatividad del INVIAS.”



- Greenpeace. (2015). Un Millón de Acciones contra el Plástico. Madrid, España: Greenpeace.
- Hachi Quintana, J.G. y Rodríguez Mejía, J. D. (2010). Estudio de Factibilidad para Reciclar Envases Plásticos de Polietileno Tereftalato (PET), en la Ciudad de Guayaquil (tesis de pregrado). Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador, Guayaquil, Ecuador
- Instituto del Asfalto. (1985). Tecnología del Asfalto y Practicas de Construcción (Comisión Permanente del Asfalto de la República de Argentina, trad.). Buenos Aires, Argentina: (Obra Original Publicada en enero de 1983).
- Khouri, N. (02 de 02 de 2012). Plastisoil. Temple, Filadelfia, Estados Unidos
- Llorens, J. (2008). Clasificación de los polímeros. Polimedia. Universidad Politécnica de Valencia. <https://polimedia.upv.es/visor/?id=ac48788e-890e-2b41-b8be3c6f3f944811>
- Mancy Monsa, A. (2017). Modification of Hot Mix Asphalt Using Polyethylene Therephthalate (PET) Waste Bottles [Modificación de una Mezcla Asfáltica en Caliente Utilizando Residuos de Botellas de Tereftalato de Polietileno]. Journal of Engineering and Computer Sciences (JECS), 18(1).
- Martínez, J. J. (2014). Incorporación de Tereftalato de Polietileno como Agente Modificador en el Asfalto (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali, Colombia.
- Mershed, K.; Mohammed, B. y Adil, D. (2015). Utilization of Waste Plastic Water Bottle as a Modifier For Asphalt mixture Properties [Utilización de la Botella de Agua Plástica Residual como un Modificador para las Propiedades de la Mezcla de Asfalto]. Journal of Engineering and Development, 20(2).
- Minaya, S. y Ordoñez, A. (2001). Manual De Laboratorio Ensayos Para Pavimentos Volumen I. Universidad Nacional De Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil, Lima, Perú.
- Ministerio de Transporte. (2015). Informe de gestión. Bogotá: República de Colombia.
- Ministerio de Ambiente Desarrollo Sostenible. (2016). Informe anual de gestión. Bogotá: República de Colombia.
- Morales, P. (2008). Construcción y conservación de vías. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería

- Movilla-Quesada, D., Raposeiras, A. C., y Olavarría, J. (2019). Effects of Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) on Stiffness of Hot Asphalt Mixtures [Efectos del Tereftalato de Polietileno Reciclado (PET) sobre la Rigidez de las Mezclas de Asfalto Caliente]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2019/6969826>
- Rondón, H. A., & Reyes, F. A. (2015). *Pavimentos*. Colombia: MACRO
- Sánchez, F., & Campagnoli, S. X. (2016). *Pavimentos asfálticos de carreteras*. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sherwell Betancourt, G. F. (2014). “Estudio del uso de Polietileno Tereftalato (PET) como material de refuerzo de estructuras térreas conformadas por suelo fino” (tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Silvestre Velásquez, D. F. (2017). *Comparación Técnica y Económica entre las Mezclas Asfálticas Tradicionales y Reforzadas con Plástico Reciclado en la Ciudad de Lima-2017* (tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- Sojobi, A. O., Nwobodo, S. E., & Aladegboye, O. J. (08 de 01 de 2016). Recycling of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle wastes in bituminous asphaltic concrete. Omu Aran, Kwara, Nigeria
- Sulyman, M., Haponiuk, J., & Formela, K. (2016). Utilization of recycled Polyethylene Terephthalate (PET) in Engineering Materials a review. *International Journal of Environmental Science and Development*, v7, 100-108.
- Usman, N., Idrus Bin Mohd Masirin, M., Abdullahi Ahmad, K., & Ahmed Wurochekke, A. (2016). Reinforcement of Asphalt Concrete Mixture using Recycle Polyethylene Terephthalate Fibre [Refuerzo de la Mezcla de Hormigón Asfáltico Utilizando Fibra de Tereftalato de Polietileno Reciclado]. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(46). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i46/107143>
- Wan, M.N., Wan. A.R. & Achmad, A. W. (2013). Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. *Journal Procedia Engineering*, 53, 124 – 128.
- Xiao, Y. (2009). *Evaluation of engineering properties of hot mix asphalt concrete for the mechanistic-empirical pavement design*. Tallahassee: Florida State University.