

# **DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CARACTERÍSTICAS DE PAVIMENTOS FLEXIBLES O BITUMINOSOS CON LA ADICIÓN DE TEREFTALATO DE POLIETILENO COMO MATERIAL CONSTITUTIVO**

**Patricio Romero Flores<sup>(1)</sup>, Guillermo Huertas Cadena<sup>(1)</sup>, Juan Cazar Ruiz<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción

Universidad de las Fuerzas Armadas. ESPE

Av. Gral. Rumiñahui, Sangolquí - Ecuador

[peromero@espe.edu.ec](mailto:peromero@espe.edu.ec)

## **RESUMEN**

En la presente investigación se buscó dar un uso útil a la gran cantidad de desechos plásticos generados en nuestro país aprovechándolos como material constitutivo adicional de mezclas asfálticas en caliente que dan pie a los muy conocidos pavimentos flexibles o bituminosos. Para el diseño se siguieron los procedimientos dictados por las distintas normas utilizadas en nuestro país analizando detenidamente la forma y método que permitiera la introducción del material plástico de una manera viable y óptima; es decir, tratando de generar buenos resultados. Una vez presentes los lineamientos se compararon los resultados de mezclas en caliente tal cual la norma junto con mezclas en caliente con plástico en su constitución.

## **ABSTRACT**

In this research we aimed to provide a useful use of the large amount plastic waste generated in our country taking advantage of them as an additional constituent material in hot mix asphalt that give rise to the well-known flexible or bituminous pavements. About the designing, we followed the procedures set by all different standards used in our country analyzing carefully the form and method that allow us the plastic material introduction in a viable and optimally way, trying to generate good results. Once we had the guidelines, results in standard hot mixtures were compared with hot mixtures with plastic in its constitution.

## 1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país se destaca en mayor medida el uso de pavimentos flexibles y dependiendo del correcto análisis de cada proyecto se puede prever que el factor económico puede ser decisivo al momento de seleccionar un tipo de pavimento sobre otro.

En varios países se viene experimentando el uso del plástico como material constitutivo del pavimento pero debido al proceso de obtención de patentes los resultados de estas investigaciones no han visto la luz de manera extensa por lo que lamentablemente no existe información técnica detallada ni mucho menos una norma de aplicación que explique cómo manejar el plástico en mezclas asfálticas en caliente por lo que esta investigación se centró en darle una respuesta a esta incertidumbre. Si bien es cierto existen procedimientos en los diferentes métodos de diseño de pavimentos como el método marshall tradicional, o el superpave en uso en los países desarrollados, que implican la verificación y comprobación de las cualidades mecánicas del agregado y del asfalto, pero no así de un aditivo modificador.

La construcción de carreteras es un síntoma de desarrollo de una nación y nuestro país no es la excepción ya que en los últimos años ha habido un despunte en el número de vías de primer orden. Es por esto que la tecnología en desarrollo de pavimentos está avanzando constantemente, la cual siempre debe ir de la mano de un proceso que sea favorable con el medio ambiente.

Cabe destacar que en los últimos cinco años la inversión estatal se ha dirigido de manera primordial a la construcción y reconstrucción de carreteras de tal manera que se pueda proveer al país de vías de primer orden y que cumplan con estándares de calidad, durabilidad y seguridad.

Con respecto al Medio Ambiente, se podría ayudar mucho a mantener el mismo al reciclar productos plásticos y darles un uso técnico en el diseño de pavimentos ya que la contaminación provocada por desechos plásticos es crítica en el país y de acuerdo con información de prensa, en la capital, el 65% de la basura es material orgánico y 35% inorgánico, generados en un 70% por hogares y 30% por industrias y comercio. Entre los principales desechos inorgánicos están el plástico, tetra-pak (polietileno, cartón y aluminio), papel, cartón, vidrio, aluminio y lata. En los últimos años, por las tendencias del mercado, los productos alimenticios usan envases de plástico que, por su menor costo, han sustituido al vidrio y al cartón.

Las quejas y críticas por parte de muchos usuarios de las vías y que corresponden a muchos sectores de la sociedad son generalizados debido a la presencia recurrente de problemas de calidad en vías y que lastimosamente alteran la cotidianidad de la sociedad. Tomando en cuenta que son el medio de comunicación principal del país deben ser tratadas con la importancia suficiente pues cualquier alteración en su normal funcionamiento puede perjudicar seriamente la economía nacional.

Por todo lo mencionado, en esta investigación se trata de proponer una alternativa para el reciclaje de botellas de plástico utilizadas en bebidas carbonatadas y agua (PET Tipo I), utilizándolas en el diseño y fabricación de pavimentos flexibles, dimensionando sus resultados y comparándolos con resultados de mezclas en caliente.

## 2. ESTADO DE ARTE

Debido a todos los problemas típicos de los pavimentos flexibles a nivel nacional se ha introducido en nuestro mercado el uso de polímeros que modifican directamente a las mezclas en su composición dándoles mayor resistencia, entre otras características, pero que sin duda aumentan considerablemente los costos de los proyectos. Es por esto que nuestra propuesta se basa en el uso de material reciclado, específicamente el uso de botellas recicladas correspondientes a PET Tipo I como componente adicional de las mezclas tradicionales para el pavimento flexible.

Actualmente se sigue una normativa de diseño a nivel nacional basada en los estándares norte americanos, en donde se tipifica paso a paso el proceso para un correcto diseño junto con el

respectivo análisis de resultados; en nuestro caso, con la adición de plástico a la mezcla, seguimos los estándares de la misma forma analizando el momento y la forma de introducir el PET TIPO 1 tratando de mejorar el comportamiento de la mezcla.

Cabe destacar que el método usado generalmente es el método Marshall para diseño de pavimentos y últimamente en el diseño de pavimentos mediante el superpave, que estudia las cualidades dinámicas de mezclas asfálticas mediante el estudio de módulos de resiliencia. Pero que requiere un cambio de tecnología en el estudio de las propiedades mecánicas del asfalto y del agregado, por esta razón su uso es muy limitado o casi nulo en Latinoamérica.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

En esta investigación nos basamos en la metodología de la prueba y error diseñando mezclas bajo los lineamientos propuestos por las normas para ensayo Marshall ASTM D 6926 y ASTM D 6927. No obstante es prudente mencionar que antes de entrar en el diseño de la mezcla se caracterizó tanto al agregado grueso como al agregado fino definiendo sus propiedades volumétricas y determinando si son aptos para mezclas asfálticas de acuerdo a lo propuesto por la norma NEVI-12, volumen 3. Lo propio con el ligante asfáltico.

Se seleccionó el PET Tipo 1 por ser el más común en el medio por lo que se puede reciclar en cantidades masivas; está representado por bebidas carbonatadas, energizantes, agua embotellada, etc.

Todos los ensayos se llevaron a cabo utilizando el equipo presente en el laboratorio de suelos y de pavimentos de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE conforme a lo propuesto por cada norma.

La comparación mencionada entre mezclas asfálticas en caliente con y sin PET Tipo 1 se basó en el análisis de los distintos pesos específicos junto con los porcentajes de vacíos calculados priorizando los resultados para estabilidad y flujo de cada grupo de mezclas. Es decir que la conclusión de la investigación se basó en la capacidad de resistencia y deformación otorgados por el material plástico a la mezcla, bajo la acción de carga.

### **4. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN**

Para el inicio de esta investigación se seleccionó el material pétreo correspondiente a la mina de Pintag debido a sus características adecuadas para mezclas asfálticas, esto se determinó en función de varios análisis en proyectos de tesis anteriores que buscaron calificar a las distintas minas de la capital.

Para el agregado se priorizaron sus características más relevantes como son:

- Granulometría, que no es más que la característica física principal y fundamental de todo conjunto de partículas porque influye de forma muy importante en la resistencia mecánica del conjunto de la mezcla. Normalmente se utilizan granulometrías bien gradadas, a fin de conseguir la máxima compacidad del conjunto, aunque también se emplean granulometrías discontinuas en el caso de algunas mezclas asfálticas.
- Se consideró también el peso específico de los agregados, el cual es la relación que existe entre el peso de una sustancia cualquiera y su volumen a una temperatura cualquiera. Nos basamos en las normas ASTM C128 y C127 que cubren la determinación de la medida la densidad de una cantidad de partículas de agregado fino y grueso, la densidad relativa (gravedad específica), la absorción del agregado, entre otros.

- Abrasión según la norma ASTM C131-89, es la acción mecánica de desgaste o erosión provocado por el rozamiento de un material cualquiera con otro. El coeficiente dado por este ensayo presenta estrecha relación con la capacidad resistente del material considerado; adquiere mucha importancia en áridos para la elaboración de hormigones asfálticos; entre otros ensayos de caracterización como por ejemplo el equivalente de arena.

Con respecto al ligante asfáltico, se utilizó asfalto virgen AC-20 y se lo caracterizó mediante los ensayos de:

- El punto de reblandecimiento que nos permite identificar la tendencia que tiene un asfalto para fluir en temperaturas elevadas cuando éste entre en uso o servicio, además que puede ser un parámetro utilizado para la clasificación de bitúmenes. De esta manera se midió el punto de ablandamiento o reblandecimiento y la diferencia de temperatura existente en una misma muestra de asfalto AC-20 para conocer su calidad y su desempeño con respecto a la norma ASTM D 36-95.
- La penetración del asfalto que se define como la distancia, expresada en décimas de milímetro hasta la cual una aguja normalizada penetra verticalmente en el material en condiciones definidas de carga, tiempo y temperatura. Así determinamos la penetración de una aguja normalizada dentro de una muestra de asfalto AC-20 para conocer su consistencia con respecto a la norma ASTM D 5-97.

Con estos parámetros se calculó el índice de penetración del asfalto, el cual cumplió con los estándares propuestos por la norma.

Con los materiales constitutivos de la mezcla se realizó el procedimiento Marshall bajo las normas ASTM D 6926 y ASTM D 6927 tanto para las mezclas normales tomadas como mezclas patrón así como para las mezclas con plástico (aditivadas con PET). Una vez encontrado el porcentaje óptimo de asfalto igual al 6.5% del peso total de cada mezcla se comenzó con la introducción del plástico seleccionado correspondiente al Tereftalato de Polietileno o PET Tipo 1 en tres formas distintas:

- PET tipo 1 en forma de fibras que no excedieran los 8mm de largo y no tuvieran menos de 3mm de ancho.
- PET tipo 1 triturado pasante del tamiz 3/8 y retenido en el tamiz #4.
- PET tipo 1 triturado pasante del tamiz #10 y retenido en el tamiz #40.

Luego de ensayadas las mezclas, tanto con plástico como sin este, se realizó el análisis de densidades y vacíos como sigue:

**a) Gravedad específica neta del agregado  $G_{sb}$**

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}} \quad (1)$$

Dónde:

$G_{sb}$  = gravedad específica neta del agregado

$P_1, P_2, P_N$  = porcentajes individuales por masa de agregado

$G_1, G_2, G_N$  = gravedad específica neta individual del agregado

**b) Gravedad específica efectiva del agregado Gse**

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (2)$$

Dónde:

Gse = gravedad específica efectiva del agregado

Gmm = gravedad específica teórica máxima (ASTM D 2041/AASHTO T209) de mezcla de pavimento (sin vacíos de aire)

Pmm = porcentaje de masa del total de la mezcla suelta = 100%

Pb = contenido de asfalto con el cual ASTM D 2041/AASHTO T 209, desarrolló el ensayo; el porcentaje por el total de la masa de la mezcla.

Gb = gravedad específica del asfalto

**c) Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica Gmm**

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}} \quad (3)$$

Dónde:

Gmm = gravedad específica teórica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

Pmm = porcentaje de la masa del total de la mezcla suelta = 100.

Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Pb = contenido de asfalto, porcentaje del total de la masa de la mezcla.

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gb = gravedad específica del asfalto

**d) Absorción del asfalto Pba**

$$P_{ba} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b \quad (4)$$

Dónde:

Pba = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

Gse = gravedad específica efectiva del agregado.

Gsb = gravedad específica neta del agregado.

Gb = gravedad específica del asfalto

**e) Contenido de asfalto efectivo Pbe**

$$P_{be} = 100 \times \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{se}} \times G_b \quad (5)$$

Dónde:

Pbe = contenido de asfalto efectivo, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pb = contenido de asfalto, porcentaje de la masa total de la mezcla.

Pba = asfalto absorbido, porcentaje de la masa del agregado.

Ps = contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

**f) Porcentaje de vacíos en el agregado mineral VAM**

$$VAM = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}} \quad (6)$$

Dónde:

VAM = vacíos en el agregado mineral (porcentaje del volumen neto).

Gsb = gravedad específica neta del total de agregado.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada (ASTM D 1188 O D 2726/AASHTO T 166).

Ps = contenido de agregado, porcentaje del total de la masa de la mezcla asfáltica

**g) Porcentaje de vacíos de aire**

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \quad (7)$$

Dónde:

Va = vacíos de aire en la mezcla compactada, porcentaje del volumen total.

Gmm = gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica.

Gmb = gravedad específica neta de la mezcla asfáltica compactada

**h) Porcentaje de vacíos llenos de asfalto VAF**

$$VAF = 100 \times \frac{VAM - V_a}{VAM} \quad (8)$$

Dónde:

VAF = vacíos llenados con asfalto, porcentaje de VAM.

VAM = vacíos en el agregado mineral, porcentaje del volumen total

Va = vacíos de aire en mezclas compactadas, porcentaje del volumen total

## 5. RESULTADOS

Se pudo observar que el PET triturado retenido en el tamiz #4 y pasante del tamiz 3/8", con un porcentaje de vacíos del 4% en la mezcla, presenta valores menores en estabilidad al compararlo con una briqueta tradicional con un porcentaje óptimo de asfalto de 6.5% y al 4% de vacíos, y a su vez muestra valores superiores en flujo tanto para la briqueta normal como para los límites de la norma NEVI-12, por lo tanto, se puede concluir que esta forma de incorporar el Tereftalato de Polietileno no representa una mejora en la estructura del pavimento.

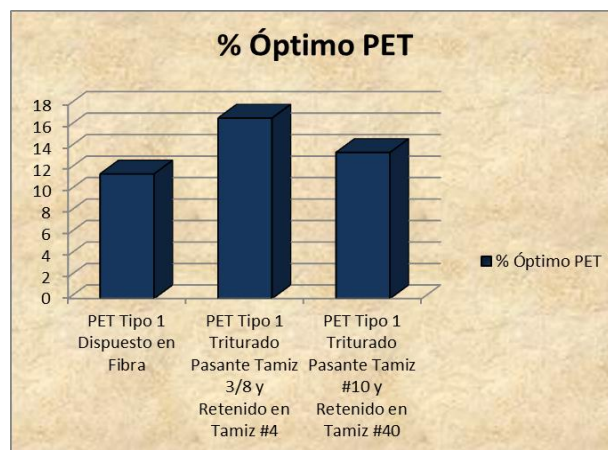
Al comparar briquetas tradicionales las cuales contienen un porcentaje óptimo de asfalto así como también un 4% de vacíos de diseño, con briquetas a la cuales se le incorporo un porcentaje óptimo de PET tipo fibra para obtener un porcentaje de vacíos del 4%, se observó que

las briquetas modificadas con PET presentan valores superiores de estabilidad y flujo, concluyendo así que se obtuvo un pavimento más resistente pero a su vez con mayor capacidad de deformación.

Con respecto al PET Tipo 1 dispuesto en forma de fibra, se recomienda que sea perpendicular al efecto de la carga de los vehículos para aprovechar en su totalidad la resistencia a flexión y sobre todo a tracción ofrecidos por cada fibra, esto lamentablemente puede dificultar su puesta en obra y por ende su correcta trabajabilidad.

**Tabla 1** Comparación de Resultados para Estabilidad y Flujo.

Características de la Mezcla	% Óptimo PET tipo 1	Estabilidad (lb)	Flujo (0.25 mm)
Tradicional sin PET tipo 1	-----	1824.0	14
Pet tipo 1 dispuesto en fibra	11.6	2120.0	23
Pet tipo 1 triturado pasante tamiz 3/8" y retenido en tamiz N°4	16.8	1730.0	21
Pet tipo 1 triturado pasante tamiz N°10 y retenido en tamiz N°40	13.8	2750.0	22



**Figura1** Comparación % Óptimo de PET

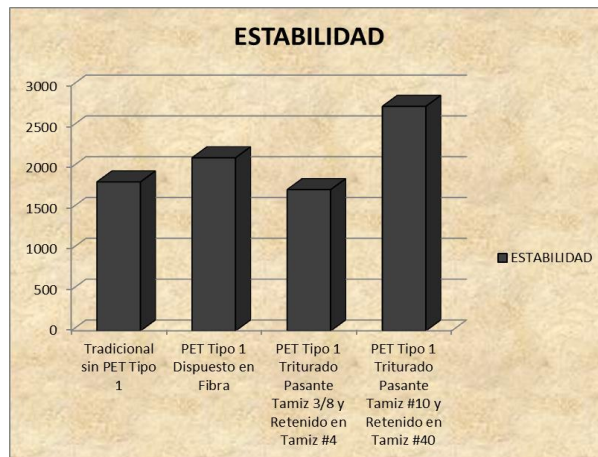


Figura2 Comparación de Estabilidades

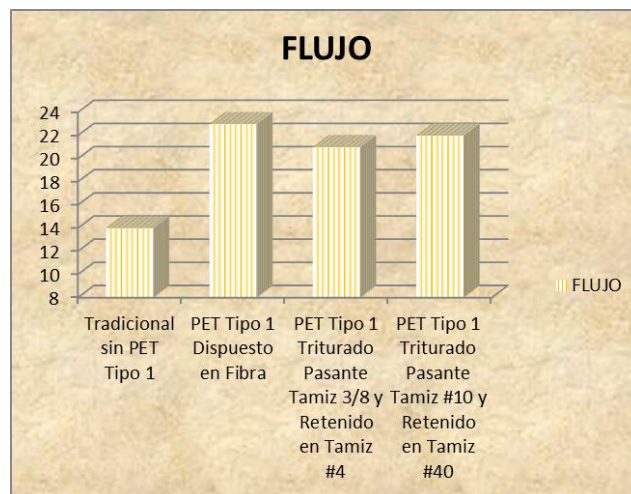


Figura3 Comparación de Flujos

A grandes rasgos se puede argumentar que se obtuvieron los resultados esperados. Si bien es cierto el plástico provoca una deformación por fuera de la norma, Según la norma NEVI-12, página 922, tabla 812-4.1, se estipula un flujo a 0.25mm entre 8 y 14 para vías de alto tráfico; en el caso actual se tiene un flujo de 22 para el porcentaje de PET Tipo 1 óptimo de 13.6% por lo que no se cumple a cabalidad la normativa; hay que tener en cuenta que con el valor aumentado de estabilidad provisto de igual manera por el plástico se va a tener un punto de rotura en un valor más alto. Es decir, que para que la mezcla entre en fluencia y pierda su capacidad dúctil se va a necesitar más carga a pesar de que se deforme en mayor medida luego del dicho punto de fluencia.

## 6. TRABAJOS RELACIONADOS

Entre la poca información que existe referente a este tema se destaca el "Plastisoil" desarrollado por el profesor asistente de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de Temple en Filadelfia, Estados Unidos, NajiKhoury. Este material se caracteriza por ser duro y permeable,



ya que es elaborado con una mezcla de suelo y botellas de plástico trituradas, entre otros elementos. Gracias a esto este pavimento no padece de problemas de encharcamiento de agua cuando llueve evitando que se acumulen residuos, muy comúnmente aceite, que pueden ocasionar problemas en la conducción.

Para la elaboración se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Se trituran y pulverizan botellas de plástico correspondiente a Tereftalato de Polietileno (PET tipo 1), el tipo de material con el que se fabrican botellas de plástico principalmente para agua y refrescos entre otros.
- b) Cuando las botellas de plástico son trituradas y mezcladas con tierra, se calientan hasta formar una sustancia dura similar al hormigón ciclópeo, pero más **permeable y poroso**, esto facilita la absorción del agua, aceite, entre otras sustancias, provocando que se genere mayor adherencia y por tanto generando mayor seguridad para los vehículos en carretera.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el caso actual se necesitó de un proceso de abertura de tamices para el cumplimiento de la granulometría seleccionada comparada con los límites propuestos por la norma y hay que mencionar que puede darse el caso en que el porcentaje de vacíos  $V_a$  de las briquetas no se encuentre entre los valores de 3 y 5% recomendados por la norma NEVI-12, razón por la que un método de prueba para la respectiva corrección de este parámetro consiste en aumentar el porcentaje de material fino correspondiente al retenido y pasante del tamiz #200 como dejándolos al límite granulométrico superior propuesto por la norma NEVI 2012 MTOP.

Al comparar muestras de mezclas asfálticas las cuales contienen un porcentaje óptimo de asfalto así como también un 4% de vacíos de diseño, con briquetas a la cuales se le incorporó un porcentaje óptimo de PET tipo fibra para obtener un porcentaje de vacíos del 4%, se observó que las briquetas modificadas con PET presentan valores superiores de estabilidad y flujo, concluyendo así que se obtuvo un pavimento más resistente pero a su vez con mayor capacidad de deformación.

Para el caso de las briquetas elaboradas con PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante del tamiz #10, con un porcentaje óptimo de plástico del 13.6% en función del porcentaje óptimo de asfalto así como de vacíos igual a 4%, las cuales al ser comparadas con briquetas comunes con un porcentaje óptimo de asfalto del 6.5%, así como de vacíos del 4%, presentaron una estabilidad superior en un 33.3% y un flujo mayor en un 32% el cual ha sido semejante para todas las formas de incorporar el PET, por lo que se concluye que esta es la mejor manera de añadir al mismo como material constitutivo, además que es la forma de introducir el PET tipo 1 pues presentó el mayor valor de estabilidad entre las tres formas analizadas manteniendo una deformación similar.

Para el caso de las briquetas elaboradas con PET triturado retenido en el tamiz #40 y pasante del tamiz #10, con un porcentaje óptimo de plástico del 13.6% así como de vacíos igual a 4%, las cuales al ser comparadas con briquetas comunes con un porcentaje óptimo de asfalto del 6.5%, así como de vacíos del 4%, presentaron una estabilidad superior en un 33.3% y un flujo mayor en un 32% el cual ha sido semejante para todas las formas de incorporar el PET, por lo que se concluye que esta es la mejor manera de añadir al mismo como material constitutivo, además

de que es la forma más viable de introducir el PET tipo 1 pues presentó el mayor valor de estabilidad entre las tres formas analizadas manteniendo una deformación similar.

A futuro se puede introducir distintos materiales reciclables a la mezcla para dimensionar sus resultados. En esta investigación, se puede seguir con el análisis enfatizando ahora la medición y control de la deformación y tratando de reducirla a los límites propuestos por las normas vigentes.

## 8. RECOMENDACIONES

- Luego del proceso de abertura de tamices para el cumplimiento de la granulometría seleccionada comparada con los límites propuestos por la norma puede darse el caso en que el porcentaje de vacíos  $V_v$  de las briquetas no se encuentre entre los valores de 3 y 5% recomendados por la norma NEVI-12, razón por la que un método de prueba para la respectiva corrección de este parámetro consiste en aumentar el porcentaje de material fino correspondiente al retenido y pasante del tamiz #200 como se hizo en el caso actual dejándolos al límite granulométrico superior propuesto por la norma.
- Es recomendable que al manejar e introducir el PET tipo fibra se tengan dimensiones mayores a 3mm de ancho pues dimensiones menores no resisten el calor de la mezcla y compactación de una briketa y por ende de un pavimento en caliente, ocasionando que las fibras se deformen en exceso y pierdan desde su longitud hasta su consistencia.
- De igual forma, con respecto al PET Tipo 1 dispuesto en forma de fibra, se recomienda que sea perpendicular al efecto de la carga de los vehículos para aprovechar en su totalidad la resistencia a flexión y sobre todo a tracción ofrecidos por cada fibra y esto puede dificultar su puesta en obra y por ende su correcta trabajabilidad.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] American Society for Testing and Materials ASTM. (2006). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures. Pennsylvania: ASTM.

[2] American Society for Testing and Materials ASTM. (2010). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Bituminous Mixtures*. Pennsylvania: ASTM.

[3] Asphalt Institute MS-22. (2009). Construction of Hot Mix Asphalt Pavements, Second Edition. En A. I. MS-22, *Asphalt Institute MS-22* (pág. Cap. 3). United States: Asphalt Institute MS-22.

[4] Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP. (2013). Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 MTOP. En S. d. Transporte, *Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos y Puentes* (págs. 400-533). Quito: Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador MTOP.