

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de viabilidad de pavimentos asfálticos adicionando tereftalato de polietileno y polipropileno reciclado en Guatemala

Trabajo de graduación presentado por Juan Luis Rueda Cruz para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2023



Análisis de viabilidad de pavimentos asfálticos adicionando tereftalato de polietileno y polipropileno reciclado en Guatemala

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Análisis de viabilidad de pavimentos asfálticos adicionando tereftalato de polietileno y polipropileno reciclado en Guatemala


Trabajo de graduación presentado por Juan Luis Rueda Cruz para optar el grado académico de Licenciado en Ingeniería Civil

Guatemala

2023

Vo. Bo.

(f)




---

Ing. Rodrigo Rubio Haasler

Tribunal Examinador:


(f)



---

Ing. Rodrigo Rubio Haasler

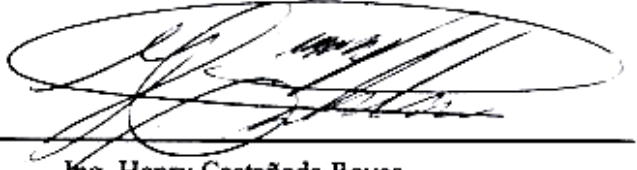
(f)



---

Ing. Roberto Goda Levensen

(f)



---

Ing. Henry Castañeda Reyes

Fecha de aprobación: Guatemala 6 de diciembre de 2023.

## **PREFACIO**

Desde hace varios años, uno de los temas de más importancia a nivel mundial es el cambio climático. No es secreto para nadie que alrededor del mundo se han llevado a práctica estilos de vida en donde se ha priorizado el aspecto económico por sobre las buenas prácticas que aseguren un desarrollo sostenible. Es de esta urgencia, que la ingeniería civil ha buscado soluciones constructivas que puedan dar uso a los desechos generados dentro de la sociedad y que no alteren de forma brusca el comportamiento final del proyecto. De esta búsqueda de alternativas y de mi pasión por la ingeniería civil nace la inspiración para realizar un trabajo de graduación que pueda tener un impacto verdadero. Por ello, es necesario recalcar y agradecer a todas las personas que me han ayudado en este proceso de investigación sobre la adición de polímeros como tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) en una mezcla asfáltica.

Es importante hacer hincapié, que cada una de las personas mencionadas a continuación tuvieron una importancia inmensa. Por tanto, es imposible mencionar el orden de importancia, ya que sin el apoyo y conocimiento de cada uno de ellos la investigación no hubiera podido contar con el mismo nivel de detalle o, probablemente, hubiera resultado inviable la realización de esta.

En primer lugar, quiero agradecer al ingeniero Rodrigo Rubio por toda su colaboración a lo largo del desarrollo de todo el trabajo. No es posible representar en palabras todo el aporte que logró enriquecer el contenido de este. Desde el aporte de personal, materiales y equipo hasta la completa disponibilidad para solucionar dudas sobre aspectos técnicos. Las palabras que diga o exprese se van a quedar cortas para poder describir el verdadero sentimiento de gratitud y admiración. Como consecuencia, no me queda más que decir un simple y escueto: “gracias”.

En esta misma línea, quiero dar las gracias al excelente equipo de personas dentro del laboratorio. A Marlon Ruano, por su amabilidad, excelencia dentro del campo y calidad humana. Por su ayuda en elaboración de los ensayos y diseño. Por la solución de dudas, en donde se notó su genuino interés y deseo de enseñarme de tal forma que comprendiera al máximo lo que estaba pasando de forma técnica; fundamentado y avalado por toda su experiencia en lo que a pruebas a mezclas asfálticas se refiere.

Finalmente, agradezco al ingeniero José Luis Flores que, por medio de Interfisa, colaboró con el aporte y donación de la resina PET y el pellet de PP. En el contexto guatemalteco, se cuenta con muy poco apoyo al ámbito científico y ambiental. Por esto mismo, el inmenso valor del aporte logró que la investigación como tal se pudiese concretar. Asimismo, agradezco la solución de dudas y el aporte sobre el tema en los momentos en donde necesitaba a un experto que pudiese orientar la investigación.

## CONTENIDO

PREFACIO .....	i
LISTA DE CUADROS .....	v
LISTA DE GRÁFICOS .....	vi
LISTA DE ECUACIONES.....	vii
RESUMEN.....	viii
GLOSARIO.....	x
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. JUSTIFICACIÓN .....	4
III. OBJETIVOS .....	7
A. Objetivo general.....	7
B. Objetivos específicos .....	7
IV. MARCO TEÓRICO.....	8
A. Tipos de pavimentos .....	8
B. Materiales de una mezcla asfáltica.....	12
C. Ensayos en mezclas asfálticas.....	16
D. Metodologías de diseño .....	21
E. Requisitos y pautas para el diseño de mezcla en caliente .....	25
F. Plásticos reciclados .....	28
G. Pavimentos flexibles con plásticos reciclados .....	34
V. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	40
A. Material y equipos.....	40
B. Metodología .....	41
C. Procedimiento .....	43
VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	44
A. Control de calidad cemento asfáltico .....	44
B. Control de calidad de los agregados pétreos .....	45
C. Ajuste de curva de granulometría y rangos de trabajo.....	45



D.	Diseño de MAC tradicional por el Método de Marshall.....	46
E.	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 1.5% de Tereftalato de Polietileno (PET) por el Método de Marshall .....	53
F.	Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 1.5% de Polipropileno (PP) por el Método de Marshall .....	54
G.	Comparación resultados entre mezcla tradicional, mezcla con adición de 1.5% PET y mezcla con adición de 1.5% PP en Pruebas de Marshall.....	56
H.	Resultados prueba Rueda Cargada de Hamburgo.....	65
I.	Análisis de costos de materiales.....	67
VII.	CONCLUSIONES .....	70
VIII.	RECOMENDACIONES.....	72
IX.	BIBIOGRAFÍA.....	75
X.	APÉNDICES.....	82
A.	Fotografías de la fase experimental del proyecto y equipo.....	82
B.	Hojas técnicas de cemento asfáltico AC-30.....	86
C.	Hoja técnica de resina PET .....	89
D.	Informes de laboratorio de pruebas Marshall .....	91

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1 Requisitos agregados gruesos según <i>Libro Azul de Caminos</i> . ....	25
Cuadro 2 Requisitos agregados finos según <i>Libro Azul de Caminos</i> .....	26
Cuadro 3 Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico. ....	26
Cuadro 4 Especificaciones cemento asfáltico AC-30. ....	27
Cuadro 5 Requisitos Método de Marshall.....	28
Cuadro 6 Investigaciones sobre la implementación de PET y PP en MAC.....	38
Cuadro 7 Proporciones mezcla patrón. ....	41
Cuadro 8: Resultados de análisis de laboratorio cemento asfáltico AC-30. ....	44
Cuadro 9 Resultados control de calidad agregados pétreos. ....	45
Cuadro 10 Integración de agregados para MAC tipo D.....	46
Cuadro 11 Resultados promedio de diseño Marshall de MAC patrón.....	51
Cuadro 12 Resumen final para control de diseño de MAC patrón. ....	52
Cuadro 13 Resultados de estabilidad y flujo para MAC con 1.5% PET.....	53
Cuadro 14 Resultados gravedad específica bruta de la MAC con 1.5% PET.....	53
Cuadro 15 Resumen resultados para MAC con 1.5% de PET.....	54
Cuadro 16 Resultados de estabilidad y flujo para MAC con 1.5% PP. ....	54
Cuadro 17 Resultados gravedad específica bruta de la MAC con 1.5% PP. ....	55
Cuadro 18 Resumen resultados para MAC con 1.5% de PP.....	55
Cuadro 19 Comparativa entre las diferentes MAC diseñadas.....	56
Cuadro 20 Costo de materias primas .....	67
Cuadro 21 Costo de materiales por tonelada métrica de las MAC diseñadas.....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Granulometría integrada de los agregados para la MAC patrón.....	46
Gráfico 2 Porcentaje de VA en función del contenido de asfalto de la MAC. ....	47
Gráfico 3 Porcentaje de VRA en función del contenido de asfalto de la MAC.....	47
Gráfico 4 Porcentaje de VMA en función del contenido de asfalto de la MAC....	48
Gráfico 5 Peso volumétrico en función del contenido de asfalto de la MAC. ....	48
Gráfico 6 Estabilidad en función del contenido de asfalto de la MAC.....	49
Gráfico 7 Flujo en función del contenido de asfalto de la MAC. ....	49
Gráfico 8 Rel. estabilidad/flujo en función del contenido de asfalto de la MAC. .	50
Gráfico 9 Densidad RICE en función del contenido de asfalto de la MAC.....	50
Gráfico 10 Rel. polvo/bitumen en función del contenido de asfalto de la MAC. ...	51
Gráfico 11 Comparación % VA entre las MAC diseñadas. ....	56
Gráfico 12 Comparación gravedad específica bruta entre las MAC diseñadas. ....	57
Gráfico 13 Comparación gravedad específica RICE entre las MAC diseñadas. ...	58
Gráfico 14 Densidades de PET y PP implementado en las MAC modificadas. ....	58
Gráfico 15 Comparación % VFA entre las MAC diseñadas.....	60
Gráfico 16 Comparación % VAM entre las MAC diseñadas. ....	60
Gráfico 17 Comparación estabilidad de Marshall entre las MAC diseñadas.....	61
Gráfico 18 Comparación fluencia de Marshall entre las MAC diseñadas. ....	62
Gráfico 19 Comparación rel. estabilidad/ fluencia entre las MAC diseñadas. ....	63
Gráfico 20 Comparación rel. polvo/Bitumen entre las MAC diseñadas.....	63
Gráfico 21 Resultados Rueda de Hamburgo de las MAC diseñadas. ....	65
Gráfico 22 Comparativa costo por tonelada de MAC diseñadas .....	68

## **LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 1 Expresión de diseño metodología AASHTO 93. ....	23
Ecuación 2 Capacidad del material para funcionar como componente estructural del pavimento AASHTO 93. ....	23

## RESUMEN

Hoy en día, más de cuatro millones doscientos mil carros circulan a través de la red vial guatemalteca (Flores, 2021). No obstante, a pesar de la gran cantidad de vehículos que circulan, existe una serie de problemáticas entorno a ella que exige una solución urgente. Estos desafíos que enfrenta la infraestructura vial del país se pueden resumir en tres aspectos principales: cantidad y calidad, inversión y estado actual (FUNDESA, 2021). Al mismo tiempo que esto sucede, alrededor del mundo existe una preocupación creciente ante el cambio climático que exige medidas inmediatas.

En respuesta a esta problemática, en los últimos años han surgido propuestas dentro de la ingeniería civil que tienen como objetivo implementar estos desechos que se generan en la sociedad en los materiales constructivos. Justamente, el presente trabajo de graduación analiza la posibilidad de implementar polímeros reciclados como el tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) en una mezcla asfáltica dentro del contexto guatemalteco. Para ello, en el siguiente estudio busca ensayar estas mezclas modificadas con PET y PP contra una mezcla tradicional asfáltica. Para ello, se realizó previamente el diseño bajo la metodología Marshall de la mezcla patrón y de las mezclas modificadas (una con 1.5% en peso de agregados de PET y otro con 1.5% en peso de agregados de PP). Luego de realizar el diseño Marshall, se determinó que el contenido óptimo de cemento asfáltico era de 4% y en donde el principal hallazgo era el aumento en estabilidad de ambas mezclas modificadas, aunque con un mejor comportamiento por parte de la mezcla con 1.5% de PET. Posterior a ello, por motivos económicos que imposibilitaban probar todas las mezclas, se seleccionó la mezcla modificada con 1.5% de PET a ensayar en Rueda de Hamburgo para compararla con la mezcla tradicional. El principal resultado de este ensayo fue una menor deformación luego de 20,000 ciclos por parte de la mezcla con 1.5% de PET y comportamientos muy similares en ambas en cuanto a la compatibilidad del ligante asfáltico con agregados pétreos. Finalmente, al final del trabajo se presentan las

conclusiones principales de la investigación junto con las recomendaciones que deben tomarse en cuenta para hacer uso de esta solución.

## GLOSARIO

AASHTO: Siglas en inglés para referirse a “American Association of State Highway and Transportation Officials”, o sea Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte (Dirección General de Caminos, 2001).

ASTM: Siglas en inglés para referirse a “American Society for Testing and Materials”, o sea Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (Dirección General de Caminos, 2001).

Copolímeros: Estos son polímeros que están formados por la combinación de dos o más unidades monoméricas diferentes. Es decir, a diferencia de los homopolímeros, las unidades que lo componen no son iguales entre sí (Vidal, 2023).

Cristalinidad: También conocida como grado de cristalinidad se refiere al grado de orden estructural de un sólido. Mientras mayor sea el grado de cristalinidad, los plásticos serán más rígidos y resistentes, pero también más frágiles. Este parámetro estará influenciado por la estructura química y el historial térmico, es decir, las condiciones de enfriamiento durante el procesado o el postratamiento térmico (NETZSCH, 2023).

Elastómeros: Estos son polímeros que se caracterizan por ser muy elásticos y viscosos. Están formados por moléculas largas en forma de cadena larga de carbono, hidrógeno, oxígeno o silicio, cuyas estructuras químicas tienen enlaces cruzados intermoleculares y son capaces de recuperar su forma original luego de sufrir deformaciones (Infinitia, 2021).

Entrecruzamiento: Es el proceso químico en que por medio de uno o más reactivos entrecruzantes, se forma un enlace covalente entre dos o más moléculas (Salazar, 2022).

Homopolímeros: Estos son polímeros que están formados por una sola unidad monomérica. O sea, todas las unidades que componen al polímero son iguales entre sí (Vidal, 2023).

MAC: Siglas utilizadas para referirse a una mezcla asfáltica en caliente (Menéndez, 2015).

Penetración a 25 °C: Este es una prueba implementada para cuantificar la consistencia del asfalto. De forma general, asfaltos blandos van a presentar penetraciones mayores a los rígidos. Este parámetro se utiliza también como guía para caracterizar asfaltos por grado de penetración (Salazar, 2011).

Plastómeros: estos son polímeros que tienen cualidades de elastómero y de plástico (Plaut, 2020).

Policondensación: También conocida como polimerización por condensación es una polimerización en la que el crecimiento de las cadenas de polímero procede de reacciones de condensación entre moléculas de todos los grados de polimerización (Mexpolimeros, 2014).

Polimerización: Es un conjunto de reacciones químicas mediante las cuales, moléculas simples, ya sean iguales o diferentes entre sí, interactúan para formar otras moléculas de mayor peso que las originales (Noguera, 2020).

Punto de destello: también conocido como temperatura de inflamación, representa la temperatura mínima a la cual un líquido inflamable desprende suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con el aire que rodea a la superficie del líquido (Sierra, 1991).

Reología: Rama de la física que estudia el modo en que los materiales se deforman o fluyen en respuesta a fuerzas o tensiones aplicadas. En este sentido, la caracterización reológica de los materiales proporciona una idea general sobre el comportamiento de flujo viscoelástico del sistema (Infinitia, 2021).

RTFOT: Siglas en inglés para representar “Rolling Thin Film Oven Test”. Es decir, al método estándar de ensayo para el efecto de calor y el aire en una película de asfalto en movimiento o ensayo del horno rotatorio de película delgada. Este método de ensayo viene normado por la ASTM D 2872 y detalla los procedimientos y equipo necesario para simular el proceso de oxidación que sufre el ligante asfáltico durante el proceso de calentamiento y mezclado en planta para la producción de mezclas. Esto con el objetivo de pretender las s



condiciones para el posterior estudio de los cambios en las propiedades fundamentales del ligante asfáltico como la viscosidad, ductilidad, cambio de masa, entre otras (Menéndez, 2015).

Solubilidad en tricloroetileno: Este es un ensayo que determina el contenido de asfalto en el asfalto original. La porción de asfalto que es soluble en tricloroetileno está constituida por los elementos aglomerantes activos. Por otro lado, la parte insoluble se considera materia inerte y probablemente de tipo inorgánica. Este ensayo permite identificar el porcentaje de contaminantes en el asfalto (Salazar, 2011).

VA: Siglas en inglés utilizadas para representar “Voids with Air”, o sea vacíos de aire. Este parámetro son los pequeños espacios de aire que están presentes en los agregados recubiertos por asfalto en la mezcla final compactada (Benavides, 2016).

VAM: Siglas en inglés utilizadas para representar “Voids in Mineral Aggregate”, o sea vacíos en el agregado mineral. Estos son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado pétreo en una mezcla compactada, incluyendo los espacios rellenos de asfalto efectivo (Benavides, 2016).

VFA: Siglas en inglés utilizadas para representar “Voids Filled with Asphalt”, o sea vacíos rellenos de asfalto. De forma matemática, este parámetro se puede definir como el porcentaje de volúmenes de aire entre las partículas del agregado pétreo que están ocupadas por el asfalto efectivo (Garnica et al., 2004).

Viscosidad a 60 °C: Propiedad del asfalto que permite cuantificar su consistencia a 60°C. Este parámetro se utiliza para valorar el efecto de la temperatura en el comportamiento del material para, consiguientemente, proponer el rango de temperaturas en la producción de la mezcla asfáltica y su posterior colocación (Salazar, 2011).

Viscosidad cinemática a 135 °C: Esta propiedad se utiliza para garantizar condiciones adecuadas para el almacenamiento del asfalto, transporte y bombeo. Asimismo, también se

utiliza en el cálculo de temperaturas de mezclado y compactación, junto al ensayo de viscosidad absoluta a 60 °C (Salazar, 2011).

## I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, Guatemala se enfrenta a una gran cantidad de retos dentro del sector vial. Esto se debe principalmente a varios factores. En primer lugar, destaca la falta de infraestructura vial como tal, y es que Guatemala ocupa el último lugar en Centroamérica en metros de red vial pavimentada con 1.07 metros de red vial (pavimentada o no pavimentada) por habitante (FUNDESA, 2021).

Ahora bien, el ritmo de progreso es otro desafío que es importante mencionar ya que el avance no es el esperado. Desde 1995 a 2018 el país promedia aproximadamente 200 km/año de construcción de red. No obstante, Guatemala como tal necesita construir más de 47,500 km de carreteras para el año 2032, por lo que se necesitan al menos 2000 km/año para poder cumplir dicha meta (FUNDESA, 2021).

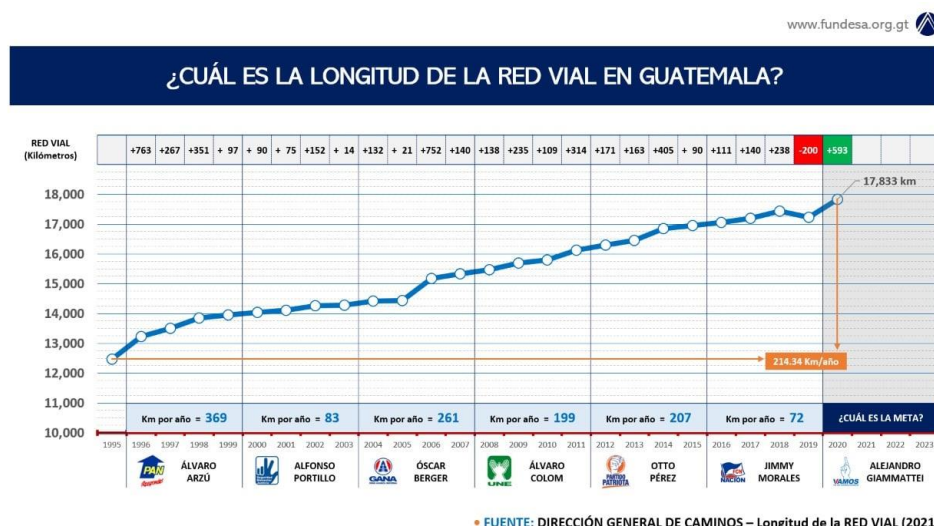
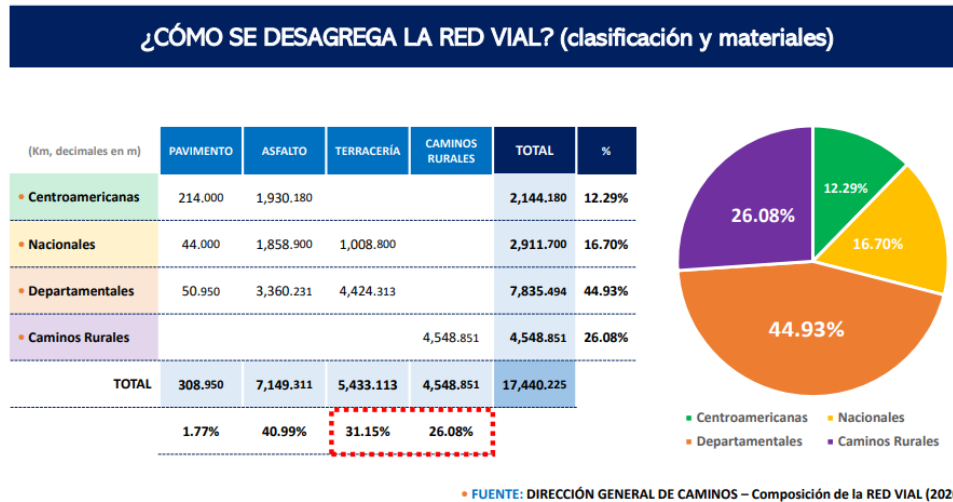


Ilustración 1 Longitud de la red vial de Guatemala desde 1996 a 2018.

Fuente: FUNDESA. (2021).

Finalmente, la mayoría de esta red está conformada principalmente por caminos rurales que, por norma general, suelen ser prácticamente de tierra. En el año 2020, más del 55% de la red vial nacional estaba compuesta por caminos rurales y de terracería por lo que se hace necesario aumentar la red pavimentada en general (FUNDESA, 2021).



**Ilustración 2 Composición de la red vial de Guatemala en 2020.**

Fuente: FUNDESA. (2021).

Al mismo tiempo, el cambio climático y sus efectos han producido un estado de alarma a nivel mundial. Esto producto de una situación crítica en donde realizar acciones de mitigación sobre los modos de producción y la cultura consumista de la población se hace fundamental. Es por ello, que una de las prácticas más usuales y que se incentivan es a reciclar y reusar los diferentes desechos que se producen.

Justamente, es de ambas problemáticas que en las últimas décadas la ingeniería civil ha buscado soluciones constructivas más sostenibles. Ejemplos de dicha tendencia existen en abundancia, aunque algunas de ellas son: bloques ecológicos, uso de desechos de demoliciones en la realización de carreteras y uso de plásticos reciclados en pavimentos flexibles, entre otros. Justamente el uso de plásticos reciclados en el desarrollo de carreteras ha sido una solución poco explorada dentro del panorama guatemalteco. Por esto mismo, el siguiente trabajo busca analizar la viabilidad de dicha tendencia dentro del contexto de Guatemala. Esto con el principal objetivo de analizar si la misma es aplicable dentro de

Guatemala. A continuación, se presentará el protocolo del trabajo de graduación en donde se describirá con más profundidad lo anteriormente expuesto.

## **II. JUSTIFICACIÓN**

Actualmente, el país se encuentra ante una crisis muy importante dentro del sector vial. Hoy en día, circulan más de 4 millones 200 mil carros a lo largo de todo el territorio nacional (Gobierno de Guatemala, 2021), por lo que se hace indispensable que las rutas en el país estén en un buen estado. No obstante, existe evidencia clara que las vías están cada vez en peor estado. La cantidad de accidentes viales ha ido en aumento desde hace varios años teniendo como pico el año 2019 con un total de 7047 incidentes (Instituto Nacional de Estadística, 2022).

Asimismo, a lo largo de los últimos años se han dado una serie de inconvenientes dentro de las rutas como deslaves o fallas de taludes. En primer lugar, existe una falta de soluciones eficientes y rápidas ante las problemáticas que surgen. Si al dilema anterior se añade una falta de rutas alternas, el resultado es una clara falta de satisfacción por la parte de las personas que día a día deben movilizarse para sus actividades diarias.

Por otro lado, uno de los principales problemas que se observa en la sociedad reside en la contaminación exagerada. Esto producto de un estilo de vida poco sostenible a largo plazo y en donde se estimula a la población a un consumo exagerado. Esto genera grandes cantidades de desechos que raramente se reciclan o reutilizan. Ejemplo de ello, está en que, según el banco mundial, Guatemala genera anualmente 2,916,350 toneladas de desechos con una expectativa de un aumento del 70% para el año 2050 (Archila, 2021). Este problema se ve aumentado debido a que gran cantidad de los desperdicios generados contaminan cuerpos de agua. Claro ejemplo de ello se observa en que cada año aproximadamente 20,000 toneladas de estos residuos plásticos pasan del río Las Vacas al río Motagua, que desemboca en las playas del Caribe de Guatemala y Honduras (García, 2022).

Ahora bien, la ingeniería ha dado pasos agigantados en las últimas décadas proporcionando soluciones más sostenibles a largo plazo. Dentro del sector vial, han surgido tendencias relacionadas con el reutilizamiento de desechos de demoliciones. La principal ventaja de estas se ha observado en que las propiedades mecánicas son muy parecidas a los materiales convencionales de cantera que se implementan en ingeniería civil (Arulrajah et al., 2017). De la misma forma, cuenta con la principal ventaja de varios casos de aplicación dentro del país. Algunos ejemplos son: Proyecto de Mejoramiento M-03-2009 Los Encuentros en Chichicastenango, Quiché; Tramo Palín-Escuintla, CA09S, Ruta Vieja, en el año 2012 y la 7ª avenida de la 5ª A la 28 Calle de la zona 12 en el año 2012 (Mendoza, 2015).

Sin embargo, esta alternativa no contempla la cuestión mencionada anteriormente relacionada a la gran cantidad de desperdicios generados por gran parte de la población. Otra alternativa más reciente que se ha implementado en últimos años han sido pavimentos de asfalto en donde se añaden ciertos plásticos. Esto con el objetivo de dar una solución sostenible en donde se aprovechen los desechos generados en la sociedad. Ejemplo de ello, está en el condado de Cumbria ubicado en Inglaterra en donde se implementó un pavimento de bitumen mezclado con plástico reciclado enriquecido. El principal resultado, fue una reducción del costo de producción del 60% y un pavimento 10 veces más durable que el de asfalto tradicional. Otro ejemplo de aplicación de esta clase de pavimentos fue en Vancouver, Canadá en donde se está realizando un pavimento que consiste en una mezcla de 80% asfalto y 20% de plásticos reciclados. La mayor ventaja que se encontró fue una reducción en costos de energía ya que la producción requiere una menor temperatura a comparación del asfalto (Lysyannikov et. al, 2019).

Dicha metodología es una gran oportunidad dentro de la realidad guatemalteca. Por un lado, están los beneficios ambientales ya que, como se mencionó anteriormente, esta metodología reduce la energía implementada en el proceso al mismo tiempo que utiliza desechos que contaminan al ambiente. Por otro lado, una implementación exitosa llevaría consigo un sinnúmero de oportunidades laborales ya que la red vial de Guatemala necesita un mantenimiento de forma urgente.

Por todo esto, la propuesta a la que está orientada esta temática busca analizar qué tan viable sería realizar pavimentos de asfalto añadiendo plásticos reciclados, más en específico tereftalato de polietileno y polipropileno, dentro del contexto actual del país. Esto con el fin de proponer una alternativa sostenible para realizar carreteras.



### **III. OBJETIVOS**

#### **A. Objetivo general**

- Analizar la viabilidad de la implementación de pavimentos asfálticos añadiendo tereftalato de polietileno y polipropileno reciclado en Guatemala.

#### **B. Objetivos específicos**

- Definir los porcentajes de tereftalato de polietileno y polipropileno a implementar en la mezcla asfáltica.
- Seleccionar los agregados pétreos y asfalto según la sección 401 del *Libro Azul de Caminos*.
- Realizar ensayo de rueda de Hamburgo (deformación) sobre la mezcla asfáltica tradicional y la modificada con tereftalato de polietileno y polipropileno.
- Determinar si con las proporciones definidas se obtiene una mezcla asfáltica balanceada en términos de rigidez y deformación.
- Desarrollar una comparativa de costos de materias primas entre la mezcla asfáltica tradicional contra las modificadas con tereftalato de polietileno y polipropileno.

## **IV. MARCO TEÓRICO**

### **A. Tipos de pavimentos**

Una carretera se puede definir como una infraestructura de transporte especialmente acondicionada dentro de una franja de terreno denominada derecho de vía, la misma tiene el propósito de permitir la circulación de vehículos de manera continua en el espacio y en el tiempo, con niveles adecuados de seguridad y comodidad (Cárdenas, 2002).

Ahora bien, uno de los componentes fundamentales para un proyecto integral de una carretera, sino es el más importante, es el diseño geométrico. Esto se debe a que través de el mismo se establece una configuración geométrica en donde se busca que la vía sea funcional, segura, cómoda, estética, económica y compatible con el medio ambiente (Cárdenas, 2002).

No obstante, existen otros componentes que se deben destacar al realizar el diseño de una carretera. Estas pautas o requisitos tienen como objetivo ayudar a resistir las demandas climáticas y de utilización a las que la misma se ve sometida. Algunas de estas características son:

- Capacidad de carga que puede llegar a soportar por tránsito de vehículos.
- Capacidad de drenaje.
- Acabado superficial.
- Capacidad de incorporarse a otros pavimentos previamente construidos.
- Edad de servicio.
- Costos de construcción y de mantenimiento.

Por otro lado, al hablar de componentes es inevitable tocar el pavimento. Este se puede definir como una estructura construida sobre la subrasante de la vía, para resistir y

distribuir los esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Suele estar conformada por las siguientes capas: subbase, base y carpeta de rodadura (Secretaría de Integración Económica Centroamericana [SIECA], 2011). Hoy en día, existen dos opciones principales de pavimentación para una carretera, calle o camino dependiendo de los objetivos y presupuesto con el que se cuenta. Estos son: pavimentos rígidos y pavimentos flexibles.

A continuación, se desarrollará más a detalle cada una de estas metodologías de pavimentación.

## **1. Métodos**

### **a. Pavimentos rígidos**

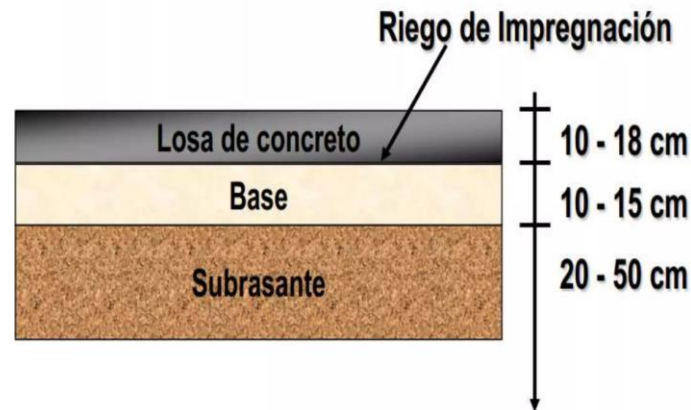
Este se puede definir como aquel que está constituido por cemento Portland como aglomerante, agregado y, de ser el caso, aditivo (SIECA 2011). Esta cuenta como capas principales: capa de concreto hidráulico, subbase y subrasante. En estos, la losa de concreto cumple con la resistencia estructural adecuada de tal forma que no ocurra una falla por las cargas que se le estén aplicando. La principal característica de este tipo de pavimentos reside en la que la capa de concreto transmite esfuerzos muy bajos a las capas inferiores debido a su alta rigidez (Menéndez, 2015).

Al describir con más detalle cada una de las capas que conforman a este tipo de pavimento, la primera a destacar es la subrasante. Esta es la capa que soporta la estructura de pavimento y se extiende hasta una profundidad en donde no afecte la carga de diseño establecida según la carga vehicular prevista. Esta capa tiene una importancia bastante elevada, esto debido a que el espesor de la losa de concreto depende en gran medida de la calidad de la subrasante. Por ello, la misma debe cumplir con los requisitos de resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por efectos de la humedad. Básicamente, la función principal que cumple la subrasante es la de soportar las cargas que transmite el pavimento y darle sustentación (Hilton & Francia, 2012).

Por otro lado, se tiene a la base que se puede considerar como la estructura del pavimento encargada de soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las cargas aplicadas a la losa de concreto. Esto de tal manera que subrasante puede soportarla

absorbiendo las variaciones inherentes a dicho suelo y que puedan afectar a la base. Para esta capa, se suelen utilizar materiales granulares ya que la misma debe favorecer a un buen drenaje y debe controlar la ascensión capilar del agua (Hilton & Francia, 2012).

Finalmente, la última capa es la losa de concreto o superficie de rodadura. Esta es la capa superior de la estructura de pavimento y que al ser de concreto sus principales ventajas se encuentran su rigidez y alto módulo de elasticidad (Hilton & Francia, 2012). En este caso, la capa de concreto trabaja a flexión soportando las cargas provenientes del tránsito de vehículos y que, al contar con una alta rigidez, transmite posteriormente las cargas sobre la subbase que, al mismo tiempo, transfiere un esfuerzo muy pequeño sobre la subrasante. A diferencia de los pavimentos flexibles, no se cuenta con más capas en su base debido a que la mayor contribución estructural se da por parte de la carpeta de concreto (Menéndez, 2015).



**Ilustración 3 Capas de pavimento rígido.**

Fuente: Ramírez, F. (2012).

#### b. Pavimentos flexibles

Los pavimentos flexibles se pueden definir como aquellos constituidos con materiales bituminosos como aglomerantes, agregados y de ser el caso aditivos (SIECA, 2011). Están formados por una carpeta bituminosa que se apoya en dos capas no rígidas: base y subbase, hasta llegar a la subrasante. El propósito de cada una de las capas es distribuir las cargas a la subrasante (Menéndez, 2015).

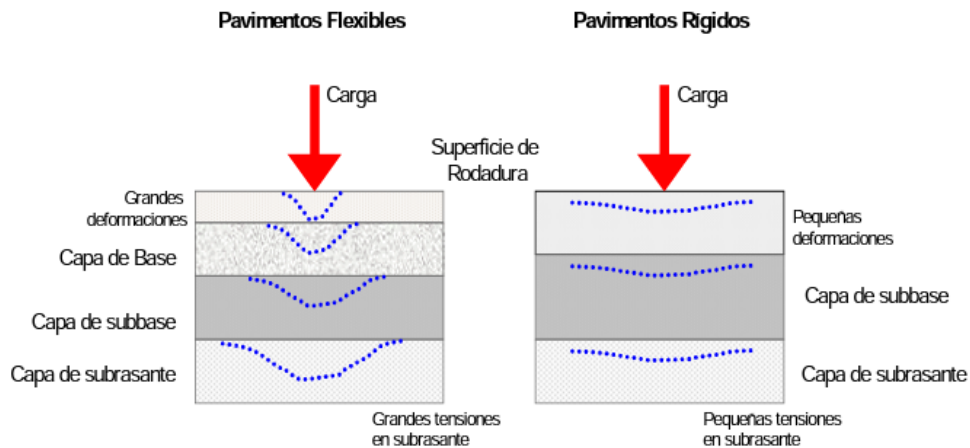
Al describir las funciones de cada una de las capas, lo cierto es que estas son muy parecidas a las de los pavimentos rígidos. No obstante, a diferencia de los pavimentos rígidos, los materiales que se implementan para realizar este tipo de pavimentos son poco rígidos. Por esto mismo, las capas suelen ser más flexibles (Menéndez, 2015).



**Ilustración 4 Capas de pavimento flexible.**

Fuente: Ramírez, F. (2012).

Justamente, en esta propiedad de los materiales que se implementan en los pavimentos flexibles es que reside la principal diferencia en comparación a los de tipo rígido. En estos, la distribución de las cargas va aumentando por lo que al final la subrasante termina con una demanda de carga mayor. Por ello, en la estructura del pavimento flexible se incorpora una capa extra de subbase debido a la necesidad de soportar deformaciones más grandes. Lo opuesto sucede en los pavimentos rígidos en donde la demanda de cargas para cada capa es muy similar (Menéndez, 2015).



**Ilustración 5 Esquema del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos.**

Fuente: Coronado Iturbide, J. (2002).

## **B. Materiales de una mezcla asfáltica**

Un pavimento flexible, como se ha visto anteriormente, implementa una mezcla asfáltica. Esta mezcla está constituida por una combinación de agregados minerales aglomerados por medio de bitumen/asfalto que cumplen el papel de material ligante. Según la proporción de agregado pétreo, la mezcla se divide en: mástico asfáltico; mortero asfáltico; macadam asfáltico y concreto asfáltico (Garnica et al., 2005). A continuación, se describirán los materiales que se implementan en este tipo de mezcla.

### **1. Bitumen o asfalto**

Este es un material cementante, de color marrón oscuro a negro, que está constituido principalmente por betunes de origen natural u obtenidos a partir de la refinación del petróleo (SIECA, 2011). Este está compuesto principalmente por materiales orgánicos, en donde destacan: aceites, resinas y asfáltenos. Cada uno de estos brinda una característica distinta. Por un lado, los aceites brindan la capacidad plástica y de movilidad, con la que permiten que el material sea trabajable. Por otro lado, las resinas proporcionan la capacidad ligante. Finalmente, los asfáltenos proporcionan la dureza (Menéndez, 2015).



**Ilustración 6 Asfalto.**

Fuente: eadic. (2016).

En ellos, el material ligante (resinas) se encuentra a grandes temperaturas y en estado líquido. Esto debido a que suelen ser susceptibles a cambios de temperatura y que,

a temperatura ambiente, el material se torna solido por lo que la trabajabilidad se torna mucho más complicada (Menéndez, 2015).

Dentro de Centroamérica, los principales tipos de asfalto utilizados dentro de la construcción de carreteras son el AC-20 y AC-30. Estos vienen normados y clasificados por la norma ASTM D 338. Ahora bien, dentro de las características a destacar del bitumen se pueden mencionar (Menéndez, 2015):

- Adhesividad: facilidad con que el betún se añade a la superficie de los agregados formando una única unidad (Menéndez, 2015).
- Susceptibilidad térmica: esta característica hace referencia a la facilidad con la que el comportamiento físico del bitumen varía según modificaciones en la temperatura (Menéndez, 2015).
- Plasticidad: esta es la capacidad que posee el betún de resistir deformaciones en rango elástico originadas por las distintas cargas a las que se ve sujeta por el tránsito de vehículos (Menéndez, 2015).
- Viscosidad: hace referencia a la oposición que presentan las partículas constituyentes del material asfáltico a desprenderse. Esto se origina debido a la fricción interna entre las partículas y la afinidad química que las mismas poseen (Menéndez, 2015).
- Envejecimiento: el material asfáltico tiende a oxidarse en presencia de oxígeno en el aire. En consecuencia, las propiedades adhesivas y químicas que posee el bitumen se van perdiendo a medida que el fenómeno ocurre (Menéndez, 2015).

Por otro lado, retomando el tema de las clasificaciones, existen cuatro diferentes las cuales son: clasificación por desempeño, clasificación por viscosidad, clasificación por penetración y clasificación de emulsiones asfálticas por fraguado. A continuación, se desarrolla cada una de ellas (Menéndez, 2015).

#### a. Clasificación por desempeño

Esta viene especificada por la norma ASTM D 6373, la cual categoriza los asfaltos según las temperaturas mínima y máxima de diseño para su implementación en obra (Menéndez, 2015).

b. Clasificación por viscosidad

En esta se categoriza la mezcla asfáltica por la viscosidad alcanzada por el material ligante a una temperatura de 60 °C. Viene normada por la ASTM D 3381 (Menéndez, 2015).

c. Clasificación por penetración

En ella, se clasifican las mezclas según el grado de penetración a 25 °C que se logra aplicando una carga apuntalada en una aguja normada de 100 gramos a 5 segundos. Dicha clasificación viene normada por la ATM D 946 M-09a (Menéndez, 2015).

d. Clasificación de emulsiones asfálticas por fraguado

1) Emulsiones de fraguado rápido

Emulsiones constituidas por la combinación de asfalto diluido en productos destilados del petróleo, que aceleran el proceso de endurecimiento (Menéndez, 2015).

2) Emulsiones de fraguado medio

Estas poseen una mayor fluidez. Esto debido a que implementan diésel que se evapora a una velocidad baja (Menéndez, 2015).

3) Emulsiones de fraguado lento

Estos se destilan con fracciones volátiles ligeras que se encuentran separadas en gran medida (Menéndez, 2015).

## **2. Agregados**

a. Procedencia y origen de agregados

Para una mezcla en caliente, es fundamental un análisis completo de los agregados, así como un control de calidad exhaustivo. La razón de esto reside en que los pequeños cambios pueden producir diferencias drásticas en las dosificaciones adecuadas. En el caso de Guatemala, los materiales que predominan como agregados son la caliza y el basalto (Menéndez, 2015).



Es importante recalcar que los agregados se pueden dividir en dos ramas principales: agregados finos y gruesos. Por un lado, los agregados finos se pueden definir como el material retenido en el tamiz no. 200. Este consiste en material tal como arena natural, material triturado o una combinación de ambos. Estos deben ser granos limpios y duros de superficie rugosa y otros materiales que impidan la adherencia del asfalto (Rosales, 2016).

Por otro lado, los agregados gruesos son aquellos retenidos en el tamiz no. 4. Entre los materiales que los componen se encuentran roca o grava triturada. Este debe ser un material durable y libre de polvo, esto debido a que el polvo evita la adherencia de los agregados pétreos al material ligante (Rosales, 2016).



**Ilustración 7 Agregados.**

Fuente: Tecnologías del concreto. (2021).

#### b. Filler mineral

Debido al proceso de lavado que se realiza en los agregados durante el ciclo de producción de la mezcla asfáltica, existe una pérdida de todas las partículas menores a los 0.075 mm. Para poder llenar estos vacíos generados, se implementa un material de relleno conocido como “Filler”. Estos deben utilizarse de manera consistente y en las proporciones correctas, ya que de lo contrario las propiedades de la mezcla pueden verse afectadas negativamente. Dentro de los materiales más utilizados como fillers se pueden destacar el polvo de roca, las cenizas volantes, sílice, cemento y cal (Menéndez, 2015).

### **3. Cal**

Material cuyo origen se encuentra en las piedras calizas que son piedras sedimentarias principalmente compuestas de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Algo a recalcar, es que las propiedades de la cal varían en función de varios estados físicos que pueden alcanzar, no obstante, de forma general este material es muy utilizado en la construcción como medio para poder ofrecer gran resistencia, durabilidad y apariencia en las distintas edificaciones (Arteaga, 2018).



**Ilustración 8 Cal.**

Fuente: Cal Noreste. (2019).

## **C. Ensayos en mezclas asfálticas**

### **1. Rueda cargada de Hamburgo (HWTD)**

Un aspecto clave a evaluar dentro de la mezcla asfáltica es la deformación permanente en la capa de rodamiento. La rueda cargada de Hamburgo (HWTD) es un ensayo que ayuda a encontrar la susceptibilidad de una mezcla asfáltica en caliente a presentar una falla prematura debido a una estructura granular débil, rigidez inadecuada de asfalto, daño por humedad y falta de adherencia entre agregado y el bitumen (Flores et al., 2018).

El equipo necesario para realizar la prueba consiste en dos ruedas de acero de 47 mm de ancho y con un diámetro de 203.2 mm que se mueven axialmente sobre el espécimen que se desea ensayar ya sea fabricado en laboratorio o extraído en campo. La carga en cada rueda es de  $71.6 \pm 0.45$  kg y su velocidad es de 30.5 cm/s aproximadamente, medida en el punto central, para generar  $52 \pm 2$  pasadas por minuto. El equipo cuenta con un baño de agua que controla la temperatura, generalmente la temperatura bajo la cual se realiza la prueba es de 50 °C. Para realizar la medición de las deformaciones, se implementan transductores (LVDT), con un rango de medición de 0 a 20 mm y una precisión de 0.01 mm. En cuanto a los especímenes, estos pueden ser cilíndricos (150 mm de diámetro y 60 mm de espesor) o prismáticos (260 mm de ancho, 320 mm de largo y 40 mm de espesor). Es necesario hacer hincapié, que para la fabricación de los especímenes estos se compactan típicamente a un porcentaje de vacíos de aire de  $7 \pm 1\%$  además de sumergirse en el agua a la temperatura anteriormente mencionada (Flores et al., 2018).

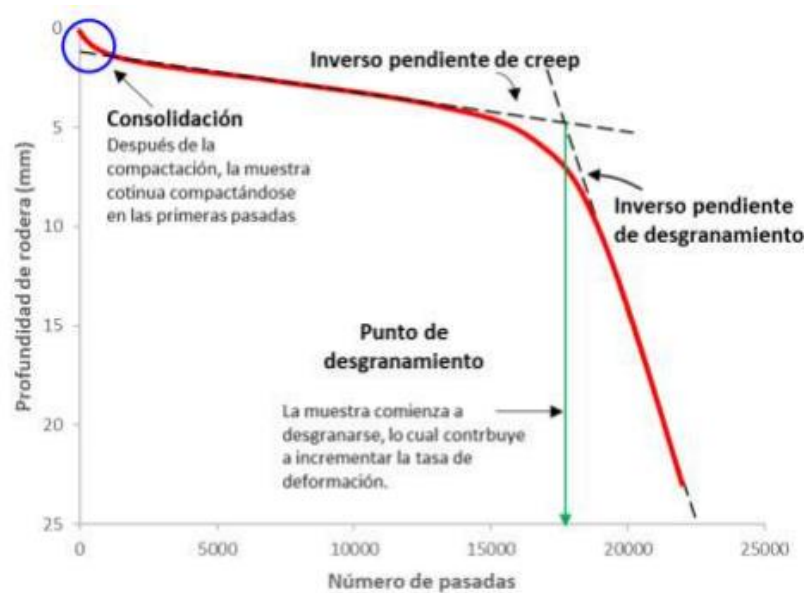


**Ilustración 9** Equipo rueda cargada de Hamburgo.

Fuente: Flores, et al. (2018).

Asimismo, al mencionar los principales parámetros que se obtienen del ensayo estos son: consolidación post compactación, pendiente del *creep*, pendiente de desgranamiento y punto de inflexión. Al definir cada uno de estos, en primer lugar, la consolidación post compactación es la deformación en mm a 1000 pasadas, esto debido a que en este número de pasadas se presume que la rueda densifica la mezcla. Por otro lado, la pendiente del

*creep* es el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación esto luego de que terminan los efectos post compactación y antes del inicio del desgranamiento (en caso de que este ocurra). Este parámetro sirve para evaluar la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico. En tercer lugar, la pendiente de desgranamiento es el inverso de la tasa de deformación en la región lineal de la curva de deformación luego de que comienza el desgranamiento hasta que termina el ensayo. En el caso de este parámetro se busca medir la acumulación de la deformación permanente debido al daño por humedad. Finalmente, el punto de inflexión del desgranamiento es la intersección de la pendiente del *creep* y de la pendiente de desgranamiento y representa el número de pasadas que una mezcla asfáltica puede soportar a una temperatura determinada antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse (Flores et al., 2018).



**Ilustración 10** Esquema resultados de un ensayo de la rueda cargada de Hamburgo.

Fuente: Flores, et al. (2018).

## 2. Probeta Semi-Circular con Corte Inducido (SCB)

La resistencia a la fatiga es una característica importante al revisar la calidad de la mezcla. Esta es la resistencia a flexión bajo cargas repetidas del tránsito en donde en un pavimento se manifiesta por una pérdida de rigidez y posteriormente por una fisuración

generalizada. Existen una gran cantidad de factores que pueden afectar dicha resistencia dentro de los cuales destacan la granulometría y tipo árido de los agregados, el contenido de asfalto, grado de compactación, entre otros. Para revisar este parámetro se implementa el ensayo de probeta semicircular con corte inducido (SCB) cuyo objetivo principal es medir la energía de fractura a una temperatura especificada y la tenacidad de la mezcla asfáltica (Delbono & Gullino, 2020).

Al describir el ensayo SCB, este consiste en someter a flexión en tres puntos aplicando una deformación con una velocidad constante de 5 mm/min sobre una probeta semicircular que presenta una fisura central. Para la fabricación de las probetas se pueden utilizar placas de mezcla de  $50 \pm 3$  mm con el compactador de rodillo (UNE EN 12697-33) y extrayendo posteriormente testigos de  $150 \pm 0.1$  mm de diámetro. Es importante destacar que existen otras metodologías para fabricar los especímenes mediante la implementación de un compactador giratorio (UNE EN 12697-31) o mediante la extracción de estos en obra (Lomas, 2022).

Al realizar la prueba, las probetas se acondicionan durante 4 horas en una cámara climatizada a la temperatura especificada  $\pm 1$  °C. Esta temperatura para la mayoría de los casos suele ser de 0 °C. Luego de este proceso de acondicionamiento, se extrae la probeta y se apoya en el dispositivo de ensayo. A continuación, comienza la prueba en donde se aplica una carga a la probeta a una velocidad de 5mm/min y en donde se registra la fuerza con una precisión de 1 N y el desplazamiento vertical con una precisión de 0.01 mm. En el caso en que la evolución de la línea de la fisura tras la rotura no se encuentre en una zona situada a  $\pm 15$  mm del centro de la platina de carga se deberá repetir el ensayo con otra probeta (Lomas, 2022).



**Ilustración 11 Probeta durante el ensayo SCB.**

Fuente: Lomas, J. (2022).

### 3. Ensayo de Tracción Indirecta (TSR)

La sensibilidad al daño por humedad en una mezcla asfáltica es otro de los aspectos relevantes dentro de los pavimentos flexibles. Esta se define como la pérdida en el desempeño de la capacidad estructural del pavimento producto la presencia de agua en el interior de su microestructura. El ensayo de tracción indirecta consiste en la aplicación de una carga de compresión a lo largo de los ejes diametrales de la probeta. El mismo reproduce el estado de tensiones en la fibra asfáltica o zona de tracción y es una excelente representación para evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción (Aranda, 2017).

Para realizar el ensayo, se implementa un Martillo de Compactación Marshall. Por otro lado, las probetas a ensayar tienen un diámetro de  $101.6 \pm 1$  mm y un espesor de  $63 \pm 2.5$  mm. Ahora bien, de forma más desarrollada el ensayo consiste en cargar una probeta con las dimensiones anteriormente descritas con una carga de compresión diametral a lo largo de dos generatrices opuestas. Producto de esta carga, se genera un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical por lo que finalmente esta tracción es la que agota el espécimen y desencadena la rotura en el plano diametral (Aranda, 2017).



**Ilustración 12 Equipo TSR.**

Fuente: Aranda Böhm, J.A. (2017).

## **D. Metodologías de diseño**

### **1. Metodología de Marshall (estabilidad y flujo)**

Previo a definir que es la estabilidad y flujo de Marshall es necesario revisar la Metodología de Marshall. Este es un método para el diseño de mezclas asfálticas cuya principal finalidad es la de encontrar la combinación adecuada de agregados minerales y cemento asfáltico que permita a esta tener un comportamiento apropiado en términos de resistencia y deformaciones. Por lo mismo, dicha metodología pretende determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregado. Asimismo, también se establecen otros aspectos importantes que la mezcla asfáltica debe cumplir como lo es la densidad y el contenido óptimo de vacíos (Cervantes & Sequeira, 2014).

Un punto destacado sobre la metodología de Marshall es que la misma solo es aplicable para muestras asfálticas en caliente y que contengan agregados con un tamaño máximo de 1 pulgada equivalente a 25 mm. Para llevar a cabo la prueba, el método utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 64 mm y 102 mm de diámetro. El procedimiento como tal está normado por la ASTM D1559 y los aspectos principales que se chequean con: densidad-análisis de vacíos y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados (Garnica et al., 2004).

Ahora bien, ya que se encuentra esta metodología explicada se pueden revisar los conceptos anteriormente mencionados. Por un lado, la estabilidad de Marshall se define como la máxima resistencia que tendrá el espécimen al aplicarse una carga. Por el otro lado, el flujo es la deformación que se genera en el espécimen las cuales se miden en unidades de 0.25 mm o 1/100 pulgadas. Básicamente, una mayor estabilidad representa una mayor capacidad de la mezcla para resistir los esfuerzos a los que se ve sujeta y a su vez, menores desplazamientos ocasionados por el flujo (Cardona et al., 2023).

### **2. Ejes equivalentes (ESAL)**

Una de las problemáticas existentes al plantear el diseño de un pavimento reside en las cargas a considerar por el tránsito vehicular. Y es que, en la actualidad, existen una gran

variedad de vehículos que día a día circulan por las diferentes rutas a lo largo del país. La principal consecuencia que esta diversidad trae son grandes espectros de carga, con diferentes espacios entre llantas los cuales originan grandes esfuerzos y deformaciones sobre la estructura. A esta problemática se añade otra en donde la estimación exacta de las cargas por ejes de cada vehículo es bastante compleja (Arias, 2016).

En Guatemala, las cargas vehiculares se rigen en base al Acuerdo Gubernativo 379-2010 que fue elaborado por la Dirección General de Caminos. De forma resumida, en este documento se puede observar los vehículos autorizados a circular por las vías nacionales además que se establece la siguiente nomenclatura: C para Camión; T para Tractor o cabezal; S para Semirremolque y R para Remolque. Asimismo, en la clasificación destaca que el número que acompaña al tipo de vehículo representa el número de ejes de este (Dirección General de Caminos, 2010).

Ya con esto comentado, en la definición de las cargas vehiculares el otro factor indispensable son los ejes equivalentes (ESAL), que en sus siglas en inglés representa “Equivalent Simple Axial Load”. Estos nacen con la necesidad de realizar una transformación del tránsito mixto en una carga que produzca un deterioro equivalente. Por lo mismo, se puede definir como el número de ejes que equivalen a una carga de 80 kN o 18 kips (de la Riva, 2016).

### **3. Metodología AASHTO 93 para diseño de pavimentos**

Esta metodología desarrollada por AASHTO se puede describir como un modelo o ecuación en donde se busca obtener un “número estructural (SN)” para el pavimento. Este parámetro representa un indicativo del espesor total requerido del pavimento. Para su determinación, se utiliza normalmente una gráfica en la cual se ingresa el valor de confiabilidad y conociendo los demás parámetros (tránsito, desviación estándar, confiabilidad e índice de serviciabilidad) se obtiene el valor del SN (García, 2015). A continuación, se describe la fórmula de diseño del método AASHTO 93:



**Ecuación 1 Expresión de diseño metodología AASHTO 93.**

$$\log(W_{18}) = Z_R * S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 \log(M_R) - 8.07$$

En donde:

- $W_{18}$  = Número de ejes equivalentes (ESLA) acumulados para el período de diseño seleccionado.
- $Z_R$  = Valor de Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada para una confiabilidad R.
- $S_0$  = Desvío estándar de todas las variables.
- $\Delta PSI$  = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.
- $SN$  = Efecto del número estructural.
- $M_R$  = módulo de resistencia efectivo en psi.

De la ecuación anterior se obtiene el valor del número estructural (SN) para luego determinar un conjunto de capas cuyos espesores ( $D_i$ ) igualen o superen el número estructural (SN) calculado anteriormente (García, 2015). Esta segunda ecuación se expresa a continuación:

**Ecuación 2 Capacidad del material para funcionar como componente estructural del pavimento AASHTO 93.**

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3$$

En donde:

- $a_i$  = Coeficiente estructural de la capa i.
- $D_i$  = Espesor de la capa i en pulgadas.
- $m_i$  = Coeficiente de drenaje de la capa i.

#### **4. Método mecanístico-empírico para diseño de pavimentos**

El procedimiento de diseño de pavimentos mecanístico-empírico, como su nombre indica, consiste en realizar un análisis mecanístico para escoger una combinación de espesores y materiales para las diferentes capas del pavimento con el objetivo de cumplir con el nivel de servicio deseado para las cargas vehiculares planteadas. Cabe recalcar, que dentro de los parámetros que el diseño mecanístico plantea destacan: efectos climáticos, modelo estructural y respuesta del pavimento, caracterización de los materiales, las funciones de transferencia y el análisis del comportamiento. Todo ello, para lograr concluir cual es el sistema de pavimento idóneo a construir. Ahora bien, la parte empírica de la metodología se encarga de predecir la vida del pavimento con base en las observaciones hechas en campo sobre cómo reacciona este a las distintas condiciones (Leiva, 2006).

Al identificar las ventajas que los principios de diseño mecanístico-empírico destaca, en primer lugar, la posibilidad de poder evaluar los efectos de la variación de los materiales en el desempeño de los pavimentos. De esta forma, se logra entregar una relación racional entre las especificaciones de los materiales y los procesos constructivos, y el diseño estructural. Asimismo, esta toma en cuenta otros factores que previamente se obviaban como lo es el caso del envejecimiento de los materiales. Otras ventajas que se pueden destacar son (Leiva, 2006):

- Permite evaluar adecuadamente las consecuencias en el desempeño del pavimento producto de las nuevas condiciones de carga.
- Mayor eficiencia en el uso de los materiales disponibles.
- Facilita el desarrollo de procedimientos mejorados para evaluar los deterioros prematuros. Esto con el objetivo de analizar el motivo por el cual algunos pavimentos exceden sus expectativas de diseño.
- Toma en cuenta los efectos estacionales.
- Logra un aumento en la confiabilidad ya que la metodología tiene varias mejoras sustanciales. Algunos ejemplos de estas son la predicción de modos de falla más probables y la minimización de las fallas prematuras.

## E. Requisitos y pautas para el diseño de mezcla en caliente

Al diseñar un pavimento asfáltico existen una serie de parámetros importantes a revisar. En la sección anterior, se revisaron aspectos sobre las metodologías de diseño respecto a la mezcla (Marshall) y estructura (AASHTO 93 y Método Mecánico-Empírico). Justamente, en la metodología de Marshall es necesario cumplir ciertos requisitos mínimos a cumplir para que la mezcla muestre un desempeño óptimo. Estas pautas que cumplir son respecto a la granulometría de los agregados, el ligante asfáltico y el desempeño de la mezcla.

Antes de empezar a mostrar los requisitos, es necesario recalcar ciertos aspectos. En primer lugar, estos son extraídos del *Libro Azul de Caminos*, más en específico en la sección 401 que se refiere a las mezclas asfálticas en caliente. Ahora bien, dentro de las mezclas definidas en dicho documento, se clasifica el cemento asfáltico por desempeño y que, posteriormente, indica las características que este debe cumplir (Dirección General de Caminos, 2001).

En primer lugar, la sección 401.3 habla sobre los requisitos de los materiales en donde se mencionan los existentes para los agregados en donde separa en dos: finos y gruesos. A continuación, se muestran estas pautas de diseño según el *Libro Azul de Caminos*.

**Cuadro 1 Requisitos agregados gruesos según *Libro Azul de Caminos*.**

<b>Ensayo para control de agregado grueso</b>	<b>Límite establecido</b>
a.) Abrasión, AASHTO T 96	35% máximo
b.) Desintegración al sulfato de sodio (5 ciclos), AASHTO T 104	12% máximo
c.) Una cara fracturada	90% mínimo
Dos caras fracturadas	75% mínimo
d.) Partículas planas o alargadas, ASTM D 4791	8% máximo

Fuente: Dirección General de Caminos. (2001).

**Cuadro 2 Requisitos agregados finos según Libro Azul de Caminos.**

<b>Ensayo para control de agregado fino</b>	<b>Límite establecido</b>
a.) Equivalente de arena, AASHTO T 176	35% mínimo
b.) Índice plástico, AASHTO T 90	4% máximo
c.) Graduación No. 2 o No. 3 de AASHTO M 29	90% mínimo

Fuente: Dirección General de Caminos. (2001).

Asimismo, se establece que las fracciones de agregado deben ser dimensionadas, graduadas y combinadas en proporciones dosificadas que resulten en una mezcla compuesta con una curva granulométrica continua, sin quiebres bruscos, situada dentro de los límites para el tamaño máximo nominal apropiado del agregado indicado en el cuadro que se muestra a continuación (Dirección General de Caminos, 2001).

**Cuadro 3 Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico.**

<b>Tamaño de tamiz (mm)</b>	<b>Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)</b>					
	<b>Graduación designada y tamaño máximo nominal</b>					
	<b>A (50.8 mm)</b>	<b>B (38.1 mm)</b>	<b>C (25.4 mm)</b>	<b>D (19.0 mm)</b>	<b>E (12.5 mm)</b>	<b>F (9.5 mm)</b>
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
63.00	100					
50.00	90-100	100				
38.1	-	90-100	100			
25.00	60-80	-	90-100	100		
19.00	-	56-80	-	90-100	100	
12.50	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50	-	-		56-80	-	90-100
4.75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.075	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Fuente: Dirección General de Caminos. (2001).

En cuanto a las especificaciones del cemento asfáltico, es necesario acudir a la norma AASHTO M226 debido a que dicha norma específica a los asfaltos de graduación

por viscosidad que justamente es el que se implementará en los ensayos de la presente investigación. En dicha norma, se establecen los siguientes parámetros para el material.

**Cuadro 4 Especificaciones cemento asfáltico AC-30.**

<b>Análisis</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Especificación</b>
Viscosidad, 140 °F (60 °C)	P	3,000 ± 600
Viscosidad, 275 °F (135 °C)	cSt	350 (mínimo)
Punto de destello	COC	230 (mínimo)
Solubilidad en tricloroetileno	%	99 (mínimo)
Gravedad específica a 15.6°C	-	REPORTAR
Penetración, 77 °F (25 °C)	100 g, 5 s	50 (mínimo)
<b>Análisis</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Especificación</b>
Cambio de masa	%P/P	1 (máximo)
Viscosidad, 140 °F (60 °C)	P	12000 (máximo)
Ductilidad, 77° F (25 °C)	5 cm/min, cm	40 (mínimo)
Temperatura de compactación	°C	REPORTAR
Temperatura de mezcla	°C	REPORTAR

Fuente: AASHTO. (2004).

Finalmente, se establecen los requisitos de diseño por el método de Marshall. A continuación, se presentan.

**Cuadro 5 Requisitos Método de Marshall.**

<b>Método de diseño</b>	<b>Valores límites</b>	
	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>
<b>MARSHALL (AASHTO T245)</b>		
Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen	75	75
Estabilidad	5338 N (1200 lb)	
Fluencia en 0.25 mm (0.1 pulg)		
• Tránsito < 10 <sup>6</sup> ESAL	8	16
• Tránsito > 10 <sup>6</sup> ESAL	8	14
Relación estabilidad/fluencia (lb/0.01 pulg)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Tabla 401-13	
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 <sup>6</sup> ESAL	65	78
• Tránsito > 10 <sup>6</sup> ESAL	65	75
Relación finos/bitumen	0.6	1.6
Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283	80%	
Resistencia retenida		
Partículas recubiertas con bitumen para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95%	

Fuente: Dirección General de Caminos. (2001).

## **F. Plásticos reciclados**

### **1. Tipos**

#### a. Tereftalato de Polietileno (PET)

El tereftalato de polietileno (PET) se puede definir como un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Este ha sido utilizado desde hace décadas en la fabricación de envases debido a las diversas propiedades que posee. Algunos ejemplos son: económico, ligero y resistente. El PET es un plástico con un comportamiento ideal, ya que en su elaboración casi no se generan desperdicios y su comportamiento químico permite cierto grado de regeneración (Colomo, 2013).

Al describir de forma breve al PET se puede mencionar que este es un plástico liviano semirrígido y cristalino. Ahora bien, entrando más en detalle el tereftalato de polietileno presenta como principal característica su resistencia al impacto. Justamente, es por esta propiedad que suele emplearse para el envase de alimentos y líquidos (Martínez & Montañez, 2021). Otras características que se pueden destacar del PET son: no se estira, no es afectado por ácidos ni gases atmosféricos, resistente al calor, absorbe poca cantidad de agua, forma fibras fuertes y flexibles. Asimismo, presente un punto de fusión alto y es resistente al ataque de polillas, bacterias y hongos (Arteaga, 2018).

Otras propiedades importantes del PET son (Arteaga, 2018):

- Procesable por soplado, inyección y extrusión
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Transparencia.
- Alta resistencia al desgaste.
- Buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química y térmica.
- Compatible con otros materiales.
- Reciclable, aunque suele disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Excelente relación costo/desempeño.

Es importante destacar que existen diferentes grados de PET. Estos se diferencian principalmente en su peso molecular y cristalinidad. Por tanto, los que presentan un menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y los de mayor peso molecular, grado ingeniería (Arteaga, 2018).



**Ilustración 13 Tereftalato de Polietileno (PET).**

Fuente: Méndez Prieto, A. (2023).

b. Polipropileno (PP)

Por otro lado, el polipropileno (PP) se puede definir como un termoplástico cristalino, que se obtiene de la polimerización del propeno. Este es ampliamente utilizado para la producción de plásticos moldeados debido a la excelente combinación de propiedades que presenta como un peso ligero y resistencia al impacto. Este es un material de gran demanda, se producen alrededor de 55 millones de toneladas anuales (Caicedo et al., 2017).

Al hablar sobre sus propiedades es importante destacar que estas dependen en gran parte de su estructura molecular, de su cristalinidad y del nivel de orientación. Y es que al existir variantes del polipropileno sus características pueden ser muy cambiantes. Estas distintas configuraciones que presenta el polipropileno se deben a la presencia del grupo metilo. Justamente, esta gran cantidad de variaciones le permite al polipropileno ser uno de los polímeros más versátiles del mercado (Morhain, 2011).

Dando continuación a las configuraciones del polipropileno, existen tres variantes principales que son: isotáctica, sindiotáctica y atáctica. De estos tres, el polipropileno isotáctico resulta el más interesante desde el punto de vista industrial debido a que presenta mejores propiedades mecánicas derivadas de su cristalinidad (Morhain, 2011).

Otro punto importante para destacar recae en que, en la actualidad, la gran mayoría de los polipropilenos utilizados industrialmente no son homopolímeros sino copolímeros



de polipropileno. Realmente estos materiales son copolímeros etileno-polipropileno con contenidos de etileno usualmente menores al 15%. La aplicación de estos copolímeros resulta interesante para aplicaciones en donde se requiere una menor resistencia mecánica y térmica, pero con un mayor alargamiento y tenacidad (Morhain, 2011).



**Ilustración 14 Polipropileno (PP).**

Fuente: Envaselia. (2018).

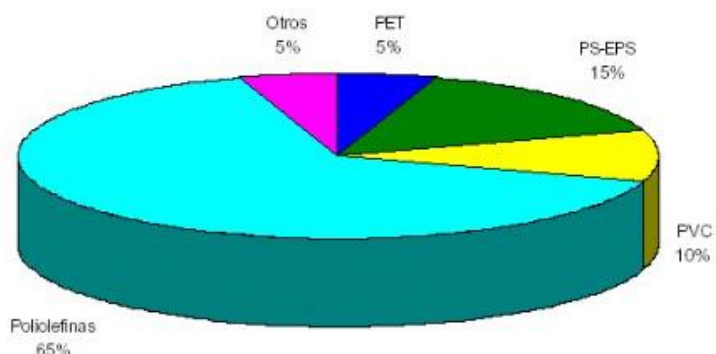
## **2. Residuos sólidos plásticos**

A pesar de la importancia de entender de que sector provienen los residuos, uno de los aspectos más importantes es conocer la clase de residuos y la proporción en que se encuentran. No obstante, el origen de los residuos es exageradamente heterogéneo y difícil de sistematizar. Es por ello, que estos se dividen en: Residuos sólidos urbanos y residuos sólidos industriales (Gujardo et al., 2000).

### **a. Residuos sólidos urbanos**

La composición de esta clase de residuos es muy heterogénea. Esto dado a la gran variedad de polímeros existentes y a la versatilidad de estos. Del gráfico que se proporciona a continuación, se puede observar que a nivel mundial los plásticos más consumidos son las poliolefinas (PEBD, PEAD y PP). Esto tiene su lógica ya que precisamente estas resinas poliméricas son las más utilizadas en la fabricación de envases y embalajes (Gujardo et al., 2000).

**Participación de los Distintos Tipos de Plásticos en los RSU**



**Ilustración 15 Residuos sólidos plásticos.**

Fuente: Guajardo et al. (2000).

#### b. Residuos sólidos industriales

Estos son los producidos en las plantas industriales. Es necesario recalcar que estos representan una cantidad menor comparados con los sólidos urbanos. Estos poseen características muy importantes ya que suelen ser homogéneos. Por esto mismo, son fáciles de recuperar y se pueden utilizar de nuevo como materia prima (Guajardo et al., 2000).

### 3. Características de plásticos reciclados

#### a. Propiedades físicas

##### 1) Densidad

Esta es una de las propiedades más importantes de un polímero. Cambios en la misma pueden reflejar un cambio en: cristalinidad, pérdida de plasticidad, absorción de solvente, etc. Al realizar pruebas sobre plásticos reciclados para observar cómo dicha propiedad cambia a diferencia del material virgen, se ha logrado observar que la densidad suele disminuir como norma general luego de volver a procesar el material (Guajardo et al., 2000).

##### 2) Índice de fluencia

Esta es una prueba realizada para estudiar el comportamiento de flujo de los termoplásticos. Al contrario que en la densidad, los plásticos reciclados suelen aumentar su índice de fluencia luego del proceso de reciclado (Guajardo et al., 2000).

#### **4. Aplicaciones en ingeniería civil**

Como se ha mencionado, existe una gran problemática a nivel mundial respecto al exceso de residuos que se genera y la contaminación que estos producen. Por ello, han surgido soluciones aparte de los pavimentos flexibles que adicionan plásticos reciclados y que es el tema principal del presente trabajo. A continuación, se mencionarán algunas de ellas.

##### **a. Construcción de viviendas**

Una de las ideas que han surgido en los últimos años para la reutilización de residuos ha sido la construcción de viviendas de bajo costo a partir de envases de PET. Dichas edificaciones representan un sistema innovador ya que logra dar una solución sostenible ya que da una nueva vida útil a los desechos al mismo tiempo que se producen estructuras resistentes, duraderas y económicas. Este sistema constructivo permite ahorrar hasta el 50% en materiales a comparación de una construcción tradicional. Por esto mismo, las personas que viven en condición de pobreza tienen más facilidad de acceso a obtener un domicilio (Arteaga, 2018).

##### **b. Concreto polimérico PET**

Otra de las aplicaciones que se utiliza en ingeniería civil nuevamente tiene como origen el PET. Justamente, a través de la descomposición química de dicho material se obtiene poliéster insaturado el cual, mediante entrecruzamiento, forma una especie de red tridimensional que da como resultado una estructura interconectada amplia y con alta resistencia. Si a este material se le adiciona arena y grava se tiene como producto el concreto polimérico. En esta mezcla, la pasta agua-cemento es reemplazada por el polímero anteriormente descrito (Arteaga, 2018).

##### **c. Ladrillos**

Esta aplicación tiene como país de origen Argentina por parte del Centro Experimental de la Vivienda Económica (CEVE). Esta es una asociación que tiene como principal labor investigar y desarrollar modelos habitacionales asequibles. Dentro de todas las patentes que se han generado, se puede destacar ladrillos hechos mediante el reciclado del PET. Estos ladrillos son hechos a partir de la molienda del PET y tiene la principal

ventaja de no requerir hornos en el secado de estos. Con ello se logra reducir el impacto generado por los hornos al mismo tiempo que se da una segunda vida al material (Arteaga, 2018).

#### d. Paneles

Otra de las patentes que se pueden destacar por parte del CEVE son respecto a paneles. En estos se utilizan cáscaras de cacahuets combinadas con resina poliéster como principales materias primas para su fabricación. Estos paneles representan una alternativa interesante para realizar paneles livianos y que provean de aislamiento. Algunas de las características más relevantes que el material provee recaen en su bajo peso y buena capacidad de aislamiento térmico (Arteaga, 2018).

## **G. Pavimentos flexibles con plásticos reciclados**

### **1. Características principales y polímeros implementados**

Reutilizar plásticos reciclados para materiales constructivos ha representado un gran reto en los últimos años. Esto debido a que las propiedades de estos varían en gran medida en comparación con el material virgen. Ya que las propiedades del pavimento dependen del plástico implementado y de la metodología de implementación, las propiedades pueden variar en gran medida (Correa y Sotero, 2021).

Por ello, en primer lugar, es necesario mencionar las propiedades reológicas de los pavimentos modificados con polímeros. Por esto mismo, se hace fundamental definir los tipos de agrietamiento que generalmente ocurren. Por un lado, el agrietamiento por fatiga es aquel provocado principalmente por el tránsito de vehículos debido a la aplicación de esfuerzos cíclicos. Por otro lado, el agrietamiento térmico es aquel producido por cambios abruptos de temperatura que tienen como resultado grietas casi uniformemente espaciadas orientadas ortogonalmente a la dirección de la carretera. Este último, es más probable que ocurra en lugares con climas fríos debido a que el asfalto se torna vidrioso, disminuyendo así la capacidad de disipar esfuerzos (Ferdaus et al., 2022).

Es aquí donde entran los modificadores, ya que uno con buenas propiedades altera las propiedades de falla del ligante permitiendo que este soporte esfuerzos y deformaciones

más grandes antes de llegar a la falla. Dichos tipos de agrietamiento mencionados anteriormente tienen como causa principal las propiedades reológicas complejas de los ligantes asfálticos. Y es que se ha logrado demostrar que son estos afectan de forma considerable el comportamiento ante los daños y desgates que sufren las mezclas asfálticas. Algunos de los modificadores que se han implementado de forma histórica son: fillers, fibras, agentes anti-stripping, antioxidantes, polímeros, etc. (Ferdaus et al., 2022).

Asimismo, seleccionar un buen modificador puede traer beneficios no solo desde el punto de vista de la ingeniería, sino que también beneficios económicos. Varios modificadores tales como poliolefinas, caucho, elastómeros termoplásticos, entre otros se han utilizado, no obstante, pocos han demostrado un buen desempeño y costo. Algunas de las propiedades de la mezcla asfáltica que se buscan alterar son: rigidez, elasticidad, fragilidad, durabilidad y resistencia al daño acumulativo (Ferdaus et al., 2022).

Ahora bien, la interacción entre los polímeros y el ligante asfáltico es bastante compleja. Los polímeros utilizados como modificadores se pueden dividir en dos grandes ramas: plastómeros y elastómeros. Los plastómeros modifican típicamente al bitumen al formar una red tridimensional rígida y resistente a la deformación. En cambio, los elastómeros tienen una respuesta elástica característicamente alta por lo que resisten las deformaciones permanentes estirándose y recuperando su forma inicial. Algunos ejemplos de elastómeros que se implementan en la actualidad como modificadores en pavimentos asfálticos son: estireno-butadieno-estireno (SBS), caucho estireno-butadieno (SBR) y estireno etileno butileno estireno (SEBS). En el caso de los plastómeros algunos de los más utilizados son: etil vinil acetato (EVA), etileno acrilato de butilo (EBA), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y policloruro de vinilo (PVC) entre otros (Ferdaus et al., 2022).

Al describir el efecto de los polímeros en la mezcla asfáltica se van a mencionar los dos que forman parte fundamental del presente trabajo: tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP). En el caso del PET es necesario mencionar que, dentro de la familia de estos, el más utilizado en el mercado es el polietileno (PE) que a su vez se divide en dos ramas dependiendo de su densidad: polietileno de baja densidad (LDPE) y polietileno de alta densidad (HDPE). El PE es un polímero termoplástico que se caracteriza por poder ser

moldeado a altas temperaturas para luego adquirir un estado rígido y sólido luego de enfriarse. Un punto que destacar recae en que se ha observado que al añadir PE a una mezcla asfáltica húmeda se logra mejorar la resistencia al desgaste del ligante asfáltico. En el caso específico del PET, se encontró que al utilizar un 10% del peso del asfalto se tiene como resultado un incremento en la densidad aparente y una reducción de costos. Es necesario comentar que una de las ventajas que tiene el PET como modificador está en que se puede implementar mediante la metodología húmeda o seca (Ferdaus et al., 2022).

En cuanto a mezclas asfálticas que cuentan con PP como modificador se ha logrado observar que la intensidad del agrietamiento se reduce. No obstante, también se observó que la mezcla no era efectiva al reducir o retrasar el agrietamiento por deflexión. Otra de las ventajas que puede aportar el PP se puede ver en una reducción de la fragilidad de la mezcla asfáltica en bajas temperaturas, así como una mejora en la flexibilidad a altas temperaturas. Finalmente, otra mejora que logra la implementación de este polímero se ve reflejada en que, cuando se implementa PP en un porcentaje del 0.5% se mejora la estabilidad de Marshall, el esfuerzo de tensión indirecta y la sensibilidad de la mezcla a la humedad (Ferdaus et al., 2022).

## **2. Estado del arte e investigaciones previas**

Con respecto al estado del arte, esta sección busca mencionar los principales avances y metodologías que se han desarrollado con el fin de implementar tanto tereftalato de polietileno (PET) como el polipropileno (PP) como modificadores de mezclas asfálticas. Cabe recalcar que, en adición a estas tecnologías, se va a repasar algunos ejemplos de investigaciones previas que ayuden a vislumbrar las ventajas y desventajas al implementar dichos polímeros.

Uno de los casos más destacables se ve en el plastisoil. Este es un novedoso asfalto fabricado a partir de botellas de plástico de PET pulverizadas mezcladas con tierra. El proceso mediante el que se desarrolla es bastante simple. Consiste en calentar la mezcla anteriormente descrita hasta formar una sustancia dura similar al cemento. Sin embargo, esta resulta más permeable y porosa por lo que facilita la absorción de agua, aceite y

suciedad al mismo tiempo que produce una mayor adherencia y seguridad al transitar por las carreteras (Romero et al., 2010).

En cuanto a la implementación de plásticos reciclados en una mezcla asfáltica existen diversidad de investigaciones en donde se han encontrado hallazgos importantes. Por un lado, está la investigación realizada por Muhammad en el año 2021 en donde se investiga el efecto de botellas de plástico (PET) y tuberías de gas (PE) en materiales asfálticos. En dicha investigación, se prueban porcentajes que van desde el 0% hasta 20% del peso del ligante asfáltico. El principal resultado que se encontró recae en que la estabilidad de la mezcla modificada aumentó después de 30 días sin dejar de cumplir los requisitos o estándares constructivos. Otro punto que destaca el trabajo son los diferentes beneficios económicos y ecológicos que la implementación de plásticos reciclados puede conseguir en la construcción de carreteras (Correa y Sotero, 2021).

Otra investigación que trae resultados interesantes es la desarrollada por Vasudevan et al. en el año 2018 que de la misma forma trata respecto al uso de polímeros en pavimentos flexibles. Un descubrimiento interesante de la investigación está en que, al utilizar una mayor cantidad de residuos plásticos, el polímero se separa de la mezcla. Esta desventaja es solucionada por parte del autor al recubrir el agregado de piedra calentado con desechos tales como bolsas de transporte, películas, espumas y multicapas y utilizarlo como materia prima. A continuación, este agregado revestido se mezcla con betún 60/70 y 80/100, en donde se encuentra una mejora en la propiedad aglutinante del material ligante. Asimismo, al igual que en la anterior investigación, se observó una mejora en la estabilidad de la mezcla. No obstante, se encontraron peores propiedades humectantes (Correa y Sotero, 2021).

En cuanto a investigaciones que se centren en la implementación del PP se cuenta con la realizada por Ponce & Villa en el año 2020 en donde se realiza un análisis comparativo entre una mezcla convencional y la modificada con PP. Las dosificaciones que se utilizaron en el estudio iban 0.5% hasta 2.5% con incrementos de 0.5% en peso de áridos. El principal hallazgo estuvo en que con una dosificación de 4.5% de cemento asfáltico e incrementadas al 1.3% de fibra de polipropileno se obtienen mejoras

significativas en resistencia al desgaste, la estabilidad, desempeño por humedad y un incremento en la durabilidad del pavimento (Correa y Sotero, 2021).

Adicionalmente, se agrega un cuadro con otras investigaciones importantes respecto a la implementación de dichos plásticos reciclados.

**Cuadro 6 Investigaciones sobre la implementación de PET y PP en MAC.**

<b>Investigación</b>	<b>Polímero implementado</b>	<b>Porcentajes probados</b>	<b>Porcentaje óptimo</b>	<b>Resultado</b>
Moghaddam et al (2013)	PET	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 (% en peso de agregados)	1	Mejora en fatiga a largo plazo.
Jegatheesan et al. (2018)	PET	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 (% en peso de bitumen)	30	Mejora en estabilidad de Marshall y propiedades generales.
Salazar (2020)	PET	1,3 y 5 (% en peso de agregados)	1-3	Con una dosificación entre 1 a 3% se cumple con los requisitos establecidos por la norma. Influye el tipo de cemento asfáltico y el tamaño del plástico implementado.
Djamaluddin et al. (2021)	PET y PP	3 (% en peso de agregados) en tres casos distintos: 100% PET, 0% PP, 0% PET, 100% PP y 50% PET, 50% PP.	50% PET y 50% PP	Con la proporción mencionada, la resistencia a compresión incrementa. Se deduce que el PET y PP pueden ser introducidos en una mezcla de cemento asfáltico
Cañari (2019)	PP	0.2, 0.4, 0.6 (% en peso de agregados)	0.2	Incremento en la estabilidad, resistencia a tracción y resistencia a ahuellamiento. Sin embargo, tiene una reducción en la resistencia al desgaste
Buruina et al. (2023)	PP	0.1, 0.3 y 0.6 (% en peso de agregados)	0.3	Aumento en la resistencia a daños inducidos por humedad.
Shanbara et al. (2020)	PP	0.2, 0.25, 0.3, 0.35 y 0.4 (% en peso de agregados)	0.3	Aumento en el módulo de rigidez de la mezcla.



### **3. Metodologías de implementación**

#### **a. Wet method**

Método implementado en plásticos de bajo punto de fusión (PE y PP). En los plásticos son derretidos y mezclados con bitumen a una alta temperatura (160 – 180°C) antes de que sean adicionados los aditivos calientes a la mezcla. Un aspecto crucial de este proceso es verificar que no existan impurezas como papel o metal en los plásticos reciclados (Giustozzi y Enfrin, 2022).

#### **b. Dry method**

Método utilizado en plásticos de alto punto de fusión (PET y ABS). El método consiste en mezclar el plástico reciclado con los agregados calientes antes de ser adicionados a la mezcla de bitumen (Giustozzi y Enfrin, 2022).

#### **c. Mixed method**

Este método resulta una mezcla de las dos metodologías mencionadas anteriormente e involucra la adición de un plástico de bajo punto de fusión a los agregados calientes para formar un revestimiento de poliolefina sobre los agregados antes de que el bitumen puro sea agregado a la mezcla (Giustozzi y Enfrin, 2022).

## V. MATERIALES Y METODOLOGÍA

### A. Material y equipos

- Pellet polipropileno (PP) colores mixtos.
- Resina tereftalato de polietileno (PET).
- Agregado grueso – Banco Chixoy 3/4”.
- Agregado intermedio – Banco Chixoy 3/8”.
- Agregado fino– arena triturada 1/4” a 0.
- Cemento asfáltico AC-30 Uno Bitumen.
- 1 equipo rueda cargada de Hamburgo.
- 1 balanza.
- 1 picnómetro.
- 1 pila a temperatura ambiente para la inmersión de probetas.
- 1 juego de moldes de acero con tapa de fondo para compactación de probetas Marshall.
- 1 pisón compactador de briquetas Marshall con su respectivo pedestal.
- Soporte de molde
- 1 extractor de testigos y especímenes compactados en laboratorio.
- 1 baño en maría para acondicionamiento de las probetas de mezcla asfáltica. con un control de temperatura de hasta  $90 \pm 1$  °C.
- Horno y placa calentadora eléctrica.
- 1 Marco de prueba y máquina para ensayo de estabilidad de briquetas por método de Marshall, con su respectivo anillo de carga y deformímetro calibrado para la medición del flujo.

## B. Metodología

La finalidad del presente trabajo de graduación se basa en analizar la viabilidad de implementar pavimentos flexibles añadiendo plásticos reciclados. Esto debido a que la aplicación de dicha metodología resulta una solución sostenible a la problemática vial y que al mismo tiempo reduce la contaminación que se genera al dar un nuevo uso a los desechos.

Por ello, principalmente se planteó analizar el desempeño de las mezclas modificadas con PET y PP y compararlas contra una mezcla típica tradicional en términos de deformación. Ahora bien, es importante destacar ciertas limitaciones que el estudio tendrá. Ya que se desea evaluar principalmente la viabilidad de utilizar la metodología en el país, se hace hincapié en que se desarrolla una mezcla de asfalto típica, en este caso una mezcla tipo D debido a que dentro de la empresa en donde se realizaron los ensayos es la más utilizada. Para ello, se utiliza la metodología Marshall en donde se encuentra el porcentaje de asfalto óptimo de acuerdo con la combinación entre agregados finos, intermedios y gruesos planteada. Asimismo, este diseño previo se utiliza para realizar la propuesta sobre la mezcla modificada. Las proporciones de la mezcla se especifican a continuación:

**Cuadro 7 Proporciones mezcla patrón.**

<b>Agregados</b>	
<b>Combinación de agregados</b>	<b>%</b>
Agregado grueso – Banco Chixoy 3/4”	35
Agregado intermedio – Banco Chixoy 3/8”	22
Agregado fino – Arena triturada 1/4" a 0	43
<b>Cemento asfáltico</b>	
<b>Tipo</b>	<b>%</b>
Cemento asfáltico AC-30 UNOPETROL	<i>Encontrado en diseño Marshall</i>

Ahora bien, al plantear las proporciones de las mezclas modificadas con PET y PP, como se mencionó anteriormente, se hace uso del diseño de la mezcla convencional, aunque

con modificaciones de tal forma que el PET y PP se implementan utilizando la vía seca (Dry Method) debido a que ninguno de los dos funde con el asfalto al tener puntos de fusión elevados. Al implementarse esta metodología para añadir los polímeros, es necesario recalcar que el porcentaje en el que se añadan tanto PET como PP afecta a los agregados pétreos. Estos porcentajes, van de la mano de lo recapitulado dentro del marco teórico en la sección de “Estado del arte e investigaciones previas”. Por ello, se propone un porcentaje de 1.5% en peso de agregados tanto para la mezcla del PP como para la de PET.

Estos porcentajes elevados se argumentan principalmente en el hecho de que el presente trabajo de graduación busca, esencialmente, dar una alternativa de uso para los desechos plásticos que se generan en la sociedad al mismo tiempo que se desarrolla la infraestructura vial del país. Por tanto, una participación alta de ambos polímeros representa un mayor aprovechamiento de esta contaminación. Con estos porcentajes, por cada tonelada de mezcla modificada se estaría reutilizando aproximadamente 14 kg de cada uno de estos materiales. Si tenemos en consideración que en una carretera típica de dos carriles se utilizan 1200 toneladas de mezcla por cada km de construcción, esto se traduce en una reutilización de 16.8 toneladas de desechos plásticos. En estas cifras es que se justifican los porcentajes propuestos.

Posterior al diseño Marshall, se procede a realizar la prueba de la Rueda Cargada de Hamburgo. El objetivo de realizar este ensayo es poder encontrar que tan susceptible es la mezcla a presentar una falla prematura producto de una estructura granular débil, rigidez inadecuada, daño por humedad y falta de adherencia entre agregado y bitumen. Debido a las limitaciones del estudio en términos financieros, esta prueba se realizará únicamente en la mezcla tradicional sin ninguno de los dos polímeros y en una de las mezclas modificadas. La mezcla modificada seleccionada, ya sea la de 1.5% de PET o 1.5% PP, será la que tenga mejores resultados en las pruebas de Marshall.

Finalmente, la última fase consiste en un análisis respecto a los hallazgos encontrados en la fase de laboratorio. Anteriormente, se comentó que el resultado final de la rueda cargada de Hamburgo es un gráfico donde se analizan las deformaciones, por tanto, se comparan los comportamientos con el fin de revisar si estos son similares entre las mezclas ensayadas y, por tanto, se obtuvieron mezclas balanceadas. Además de ello, se

busca observar si los beneficios de esta se adaptan al contexto y realidad de la Ciudad de Guatemala.

### **C. Procedimiento**

1. Muestreo completo de los agregados y control de calidad.
2. Muestreo del cemento asfáltico y análisis de reología del asfalto para control de calidad.
3. Análisis de los resultados del muestreo y selección de materias primas a utilizar.
4. Ajuste de curva granulométrica para cumplir con los requisitos del Libro Azul de Caminos.
5. Fabricación de serie de briquetas por método Marshall para el diseño de las mezclas tradicional y modificadas (con 1.5% en peso de agregados de PET y PP).
6. Ensayo del grupo de briquetas en parámetros volumétricos y de estabilidad-flujo Marshall.
7. Análisis volumétrico y del comportamiento mecánico de las mezclas diseñadas.
8. Fabricación y acondicionamiento en condiciones de humedad de probetas.
9. Ensayo de Rueda Cargada de Hamburgo para grupo de briquetas y posterior análisis de los resultados.
10. Análisis de la susceptibilidad tanto de la mezcla tradicional como de la modificada a sufrir una falla prematura.
11. Análisis de costos de las materias primas para realizar una tonelada métrica de las mezclas diseñadas.

## VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### A. Control de calidad cemento asfáltico

Como se mencionó anteriormente, el cemento asfáltico implementado en la fabricación de las probetas de ensayo fue un asfalto proveniente de UNO Bitumen y categorizado por la norma AASHTO M226 como grado AC-30. El motivo por el cual se utilizó esta categoría de bitumen fue debido a que dentro de la empresa en que se realizaron los ensayos este es típicamente usado en los diseños de mezclas que ejecutan. A continuación, se presentan los resultados del estudio reológico y de control de calidad del cemento asfáltico implementado dentro de la investigación:

**Cuadro 8: Resultados de análisis de laboratorio cemento asfáltico AC-30.**

<b>Análisis</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificación</b>
Viscosidad, 140 °F (60 °C)	P	2,753	3,000 ± 600
Viscosidad, 275 °F (135 °C)	cSt	444	350 (mínimo)
Punto de destello	COC	336	230 (mínimo)
Solubilidad en tricloroetileno	%	100	99 (mínimo)
Gravedad específica a 15.6°C	-	1.032	REPORTAR
Penetración, 77 °F (25 °C)	100 g, 5 s	62.0	50 (mínimo)
<b>Ensayos al residuo de RTFOT</b>			
<b>Análisis</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Resultados</b>	<b>Especificación</b>
Cambio de masa	%P/P	-0.510	1 (máximo)
Viscosidad, 140 °F (60 °C)	P	6,750	12000 (máximo)
Ductilidad, 77° F (25 °C)	5 cm/min, cm	150+	40 (mínimo)
Temperatura de compactación	°C	142-148	REPORTAR
Temperatura de mezcla	°C	154-159	REPORTAR

Para poder observar otros aspectos del control de calidad del cemento asfáltico como su curva reológica se puede observar en el apartado de apéndices el documento “Hojas técnicas de Cemento Asfáltico AC-30”.

## **B. Control de calidad de los agregados pétreos**

En el caso de los agregados pétreos, estos son provenientes de la cantera Chixoy y para su control de calidad se hizo uso de los requisitos planteados anteriormente y que fueron extraídos de la sección 401 del *Libro Azul de Caminos*. A continuación, se presentan los resultados:

**Cuadro 9 Resultados control de calidad agregados pétreos.**

<b>Propiedad de agregado pétreo</b>	<b>Resultado</b>	<b>Especificación</b>
Porcentaje de absorción de agua (%)	0.60	****
Porcentaje de vestimento del agregado (%)	100	Mayor a 95%
Porcentaje equivalente de arena (%)	67.6	Mayor a 35%
Índice plástico (%)	0.00	Menor a 4%
Peso unitario seco suelto (kg/m <sup>3</sup> )	1841.1	Mayor a 1360 kg/m <sup>3</sup>
Porcentaje caras fracturadas (1 cara) (%)	100	Mayor a 90%
Porcentaje caras fracturadas (2 caras) (%)	98.2	Mayor a 75%
Porcentaje partículas planas y alargadas (%)	1.80	Menor a 8%

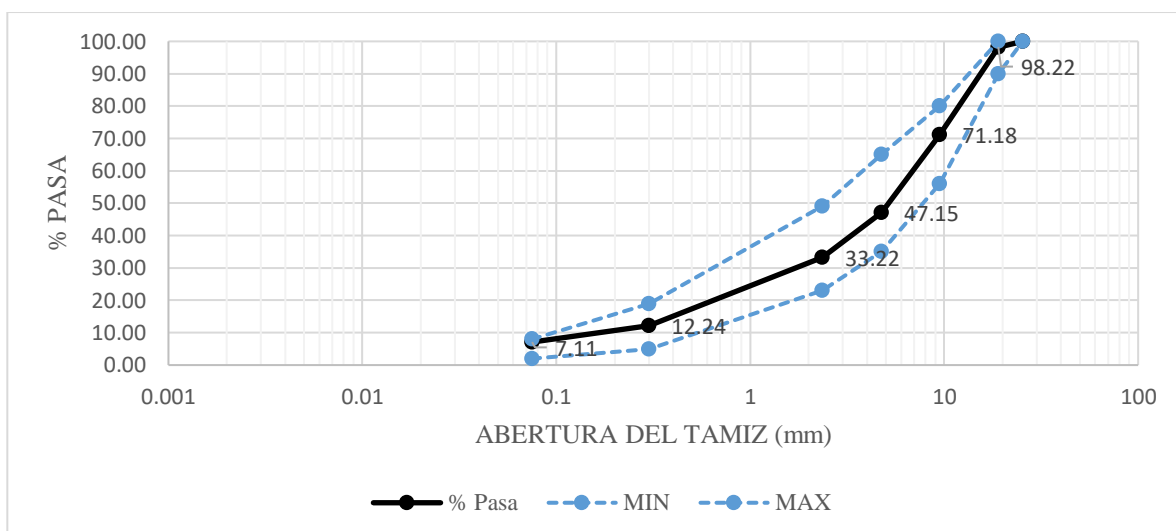
## **C. Ajuste de curva de granulometría y rangos de trabajo**

Como se mencionó dentro de la sección de metodología, un aspecto clave era el planteamiento de la combinación de agregados. Para ello, se realizó un ajuste teórico de la granulometría en donde se combinaban las curvas de los distintos agregados. Es importante destacar que en este planteamiento no se incluye ni al PET ni al PP. A continuación, se presentan los resultados. Para ver más detalles de los agregados, acudir al apartado de apéndices en el documento “Informes de Laboratorio de Pruebas Marshall”.

**Cuadro 10 Integración de agregados para MAC tipo D.**

Tamiz		Material	% Participante	Material	% Participante	Material	% Participante	Integración	Especificación Mezcla Tipo D	
ASTM	mm	3/4"	35	3/8"	22	Arena T.	43	100	Min	Max
1 1/2"	38.1	100.00	35.00	100.00	22.00	100.00	43.00	100.00		
1"	25.4	100.00	35.00	100.00	22.00	100.00	43.00	100.00	100	
3/4"	19	94.91	33.22	100.00	22.00	100.00	43.00	98.22	90	100
1/2"	12.5	44.23	15.48	100.00	22.00	100.00	43.00	80.48		
3/8"	9.5	19.34	6.77	97.32	21.41	100.00	43.00	71.18	56	80
1/4"	6.35	13.42	4.70	42.28	9.30	99.95	42.98	56.98		
No. 4	4.75	5.57	1.95	10.30	2.27	99.84	42.93	47.15	35	65
No. 8	2.36	5.14	1.80	3.72	0.82	71.16	30.60	33.22	23	49
No. 16	1.18	3.08	1.08	3.50	0.77	45.88	19.73	21.58		
No. 30	0.6	3.19	1.12	3.40	0.75	30.09	12.94	14.80		
No. 40	0.425	2.93	1.03	3.34	0.73	25.01	10.75	12.51		
No. 50	0.3	2.67	0.93	3.23	0.71	24.63	10.59	12.24	5	19
No. 100	0.15	2.40	0.84	3.12	0.69	16.49	7.09	8.62		
No. 200	0.08	2.14	0.75	2.74	0.60	13.38	5.75	7.11	2	8

**Gráfico 1 Granulometría integrada de los agregados para la MAC patrón.**



## D. Diseño de MAC tradicional por el Método de Marshall

Concluida la fase de determinación de granulometría, se debía pasar a la determinación del contenido óptimo de asfalto de la mezcla tradicional, que posteriormente se utilizaría para revisar las mezclas modificadas con PET y PP. Para ello, se ensayaron 3 probetas para cada contenido de asfalto (de 2.5 a 4.5%). A continuación, se presentan los parámetros del diseño Marshall:



## 1. Diseño bajo metodología Marshall

Gráfico 2 Porcentaje de VA en función del contenido de asfalto de la MAC.

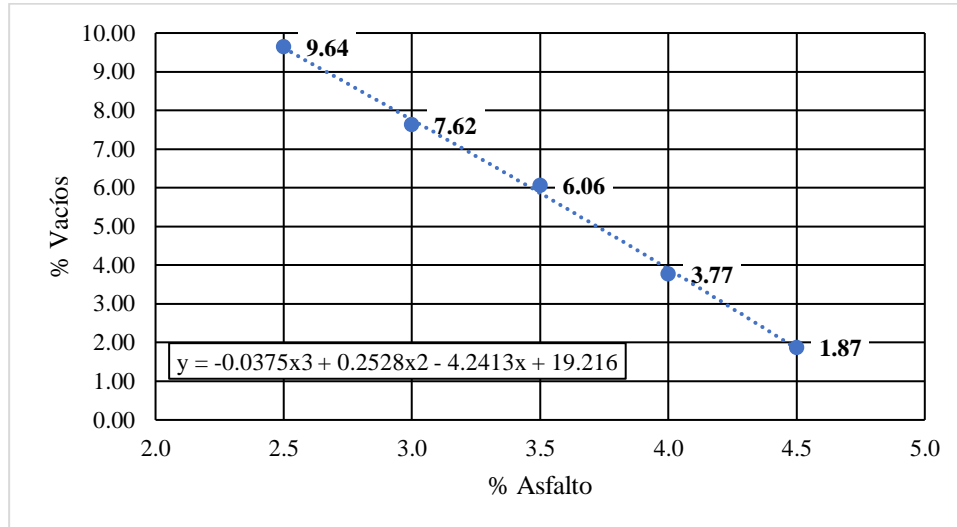
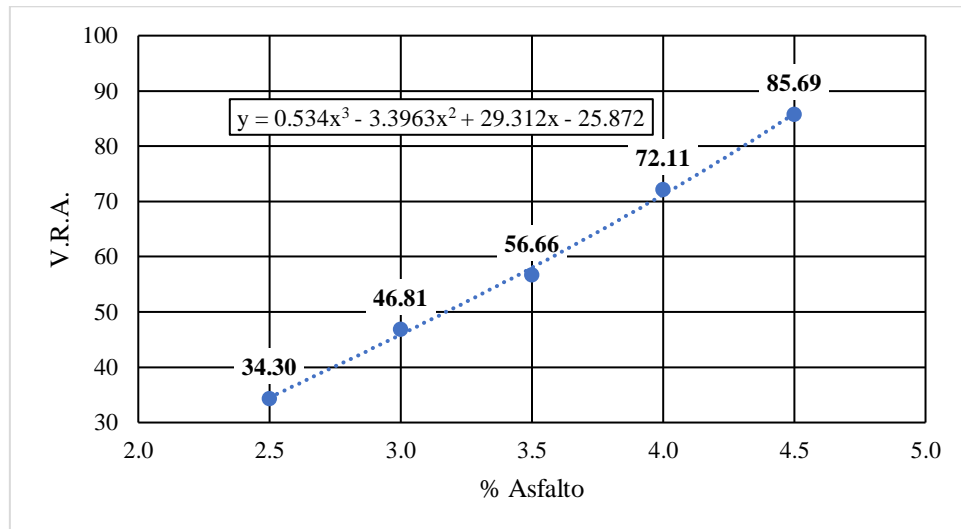
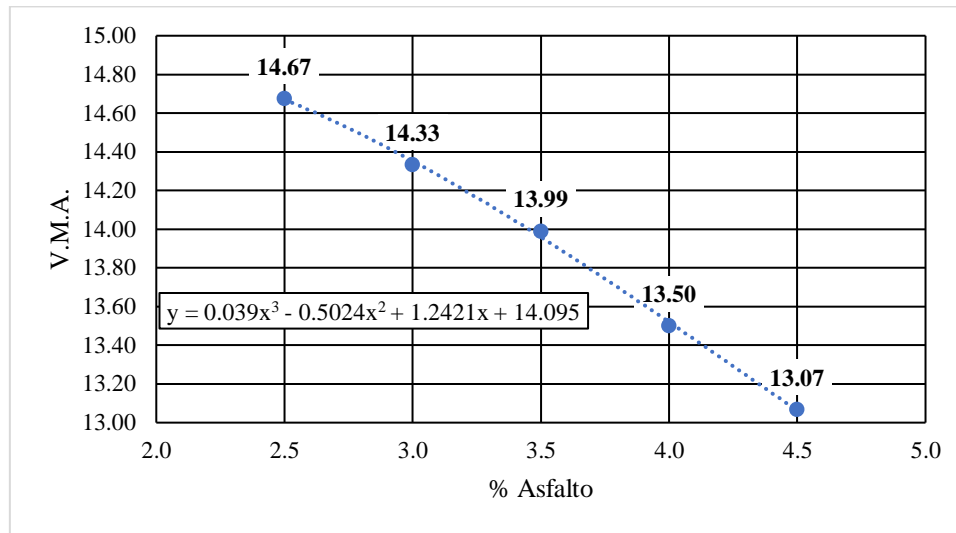


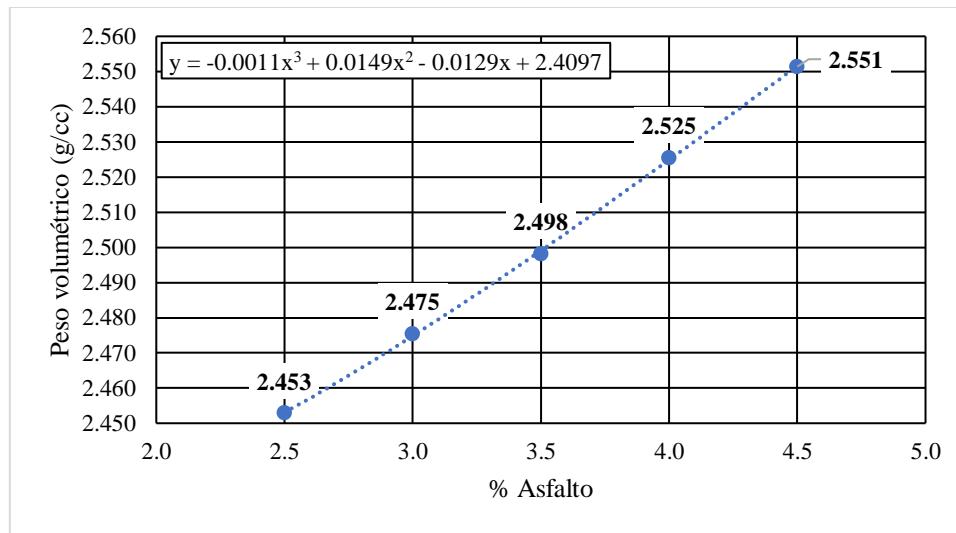
Gráfico 3 Porcentaje de VRA en función del contenido de asfalto de la MAC.



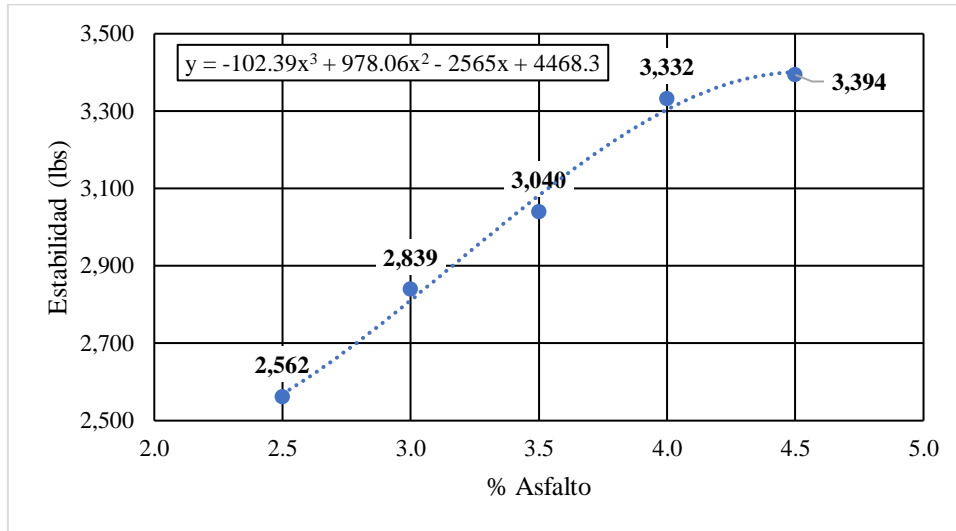
**Gráfico 4 Porcentaje de VMA en función del contenido de asfalto de la MAC.**



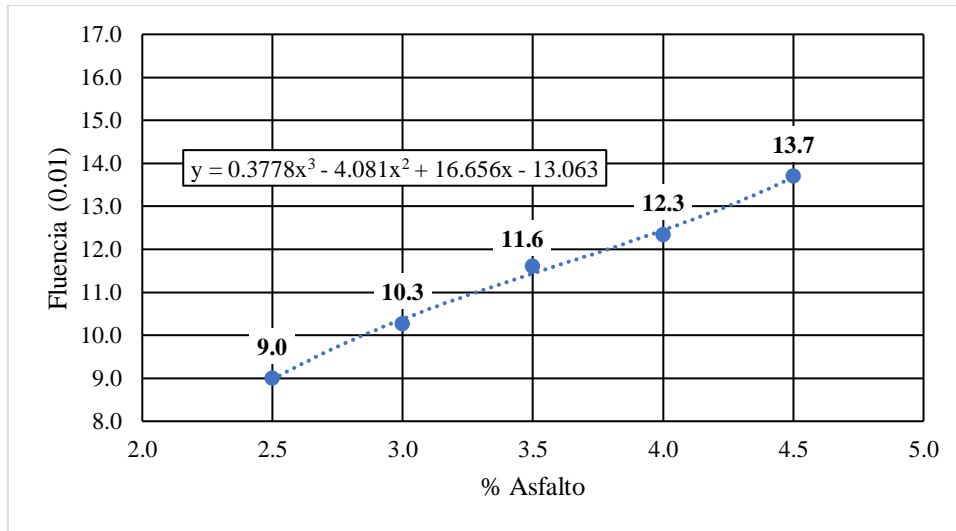
**Gráfico 5 Peso volumétrico en función del contenido de asfalto de la MAC.**



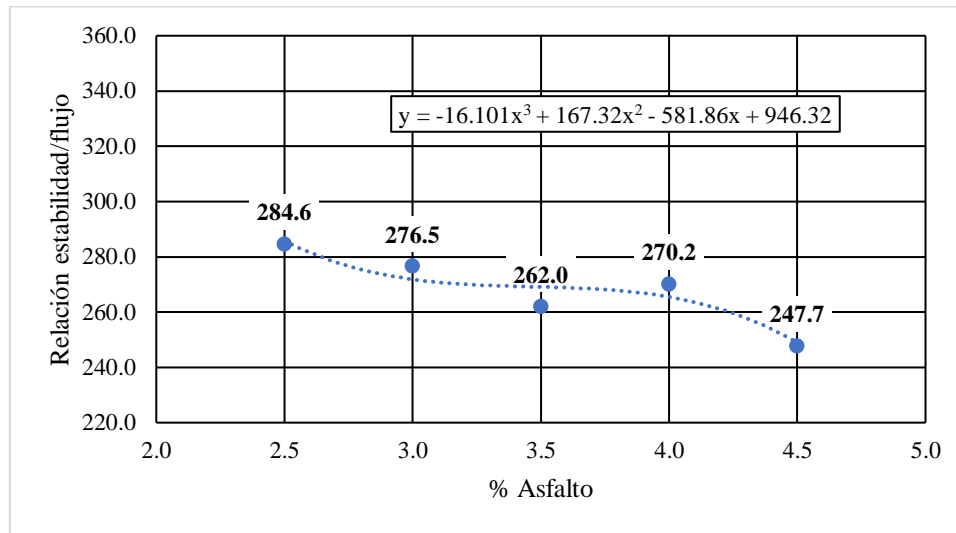
**Gráfico 6 Estabilidad en función del contenido de asfalto de la MAC.**



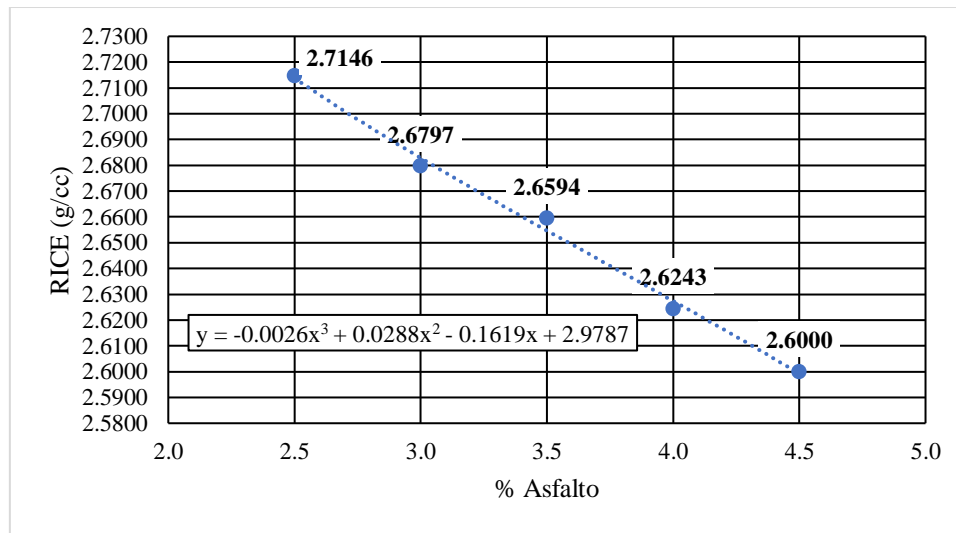
**Gráfico 7 Flujo en función del contenido de asfalto de la MAC.**



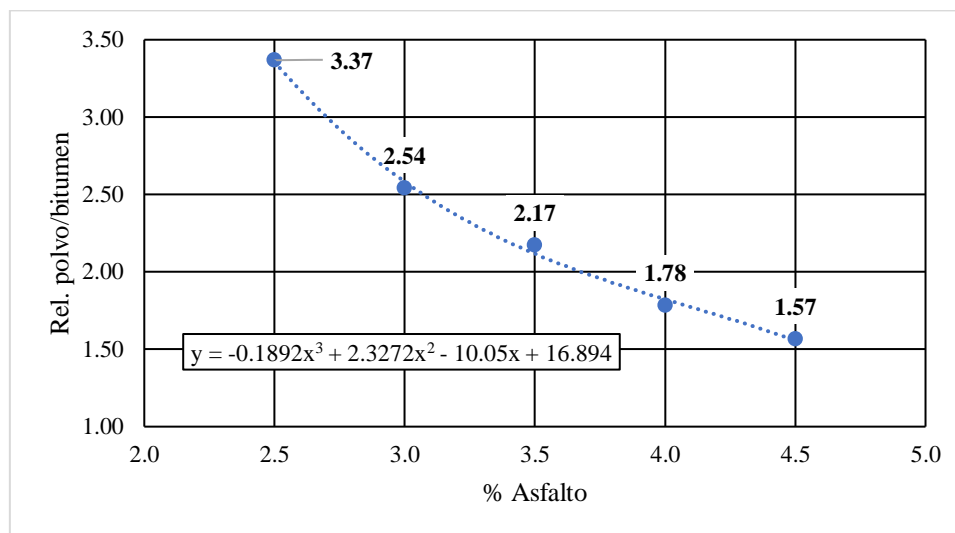
**Gráfico 8 Rel. estabilidad/flujo en función del contenido de asfalto de la MAC.**



**Gráfico 9 Densidad RICE en función del contenido de asfalto de la MAC.**



**Gráfico 10 Rel. polvo/bitumen en función del contenido de asfalto de la MAC.**



## 2. Resumen de resultados y cálculos bajo metodología Marshall

A continuación, se presenta un resumen de los resultados encontrados para el análisis de resistencia y volumetría de la mezcla bajo metodología de Marshall:

**Cuadro 11 Resultados promedio de diseño Marshall de MAC patrón.**

% Asfalto	Peso vol. (g/cm <sup>3</sup> )	Vacíos (%)	V.A.M	Rellenos	Estabilidad (lbs)	Flujo (0.01)	Relación estabilidad/flujo	Relación polvo/asfalto	RICE (g/cm <sup>3</sup> )
				V.R.A.					
2.5	2.453	9.64	14.67	34.30	2,562	9.0	284.6	3.37	2.7146
3.0	2.475	7.62	14.33	46.81	2,839	10.3	276.5	2.54	2.6797
3.5	2.498	6.06	13.99	56.66	3,040	11.6	262.0	2.17	2.6594
4.0	2.525	3.77	13.50	72.11	3,332	12.3	270.2	1.78	2.6243
4.5	2.551	1.87	13.07	85.69	3,394	13.7	247.7	1.57	2.6000

### 3. Diseño final:

**Cuadro 12 Resumen final para control de diseño de MAC patrón.**

Ensayo de Laboratorio	Unidad de medida	Resultado	Especificación
Número de golpes por cara de pastillas	-	75	75
% Optimo de asfalto	%	4.00	3 a 8
% Asfalto absorbido	%	0.32	***
% Asfalto efectivo	%	3.68	***
% Vacíos de aire	%	3.90	3 a 5
% Vacíos rellenos de asfalto	%	71.21	65 a 75
% Vacíos de agregado mineral	%	13.52	> 13
Estabilidad Marshall	lbs	3304	>1200
Fluencia Marshall	0.01"	12.4	8 a 16
Relación polvo /asfalto	-	1.82	0.6 a 1.6
Relación estabilidad /fluencia	-	266	120 a 275
Sensibilidad a la humedad (resis. retenida, estab.remanente)	-	-	> 80 %
Gravedad específica bruta de la mezcla	g/cc	2.809	***
Grav específica Rice de la mezcla AASHTO T 209 (Gmm)	g/cc	2.624	***
Gravedad específica bruta del agregado (Bulk)	g/cc	2.803	***
Gravedad específica superficie seco saturado (Bulk SSS)	g/cc	2.673	***
Gravedad específica efectiva	g/cc	2.804	***
Gravedad específica aparente	g/cc	2.851	***
Gravedad específica del asfalto	g/cc	1.033	***
% Absorción de agua	%	0.60	***
% de vestimiento del agregado	%	100	> 95
% Equivalente de arena	%	67.6	> 35
Índice plástico	%	0.00	< 4
Peso unitario seco suelto	kg/m <sup>3</sup>	1841.1	> 1360 kg./m <sup>3</sup>
% Caras fracturadas (1 cara)	%	100.00	> 90
% Caras fracturadas (2 caras)	%	98.20	> 75
% Partículas planas y alargadas	%	1.80	< 8

Finalmente, luego de haber realizado el diseño de mezcla con las proporciones de granulometría definidas anteriormente, se determinó que el contenido óptimo de asfalto AC-30 es del 4%. Este porcentaje, también se utilizará para las mezclas modificadas en donde se hallarán las propiedades de Marshall que sirvan como un punto de comparación. Asimismo, posteriormente en los ensayos de Rueda Cargada de Hamburgo este será el porcentaje de asfalto implementado. Cabe recalcar, que en el cumplimiento de estas propiedades el parámetro de relación polvo/ asfalto no cumple. Para que cumpliera se debería de aumentar el contenido de asfalto, no obstante, al aumentar este contenido el volumen de vacíos se salía del rango aceptable.

## E. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 1.5% de Tereftalato de Polietileno (PET) por el Método de Marshall

Como se mencionó anteriormente, tanto para la mezcla asfáltica con adición de 1.5% de PET como para la modificada con adición de 1.5% de PP se utilizó el diseño anteriormente mencionado con un porcentaje óptimo de asfalto de 4%. Por ello, a continuación, se presentan los resultados encontrados para las probetas ensayadas.

### 1. Estabilidad de Marshall

**Cuadro 13 Resultados de estabilidad y flujo para MAC con 1.5% PET.**

	Lectura micrómetro	Estabilidad (lb)	Volumen sin corregir	Factor de correc. por volumen	Estabilidad (lb)	Flujo (0.01")
1	348	3696	501.1	1.04	3843	14.0
2	320	3399	493.7	1.09	3705	14.5
3	310	3293	489.0	1.09	3590	15.0
4	338	3590	490.0	1.09	3913	13.6
5	328	3484	493.7	1.09	3797	14.0
<b>Promedio</b>	<b>329</b>	<b>3492</b>	<b>493.50</b>	<b>1.08</b>	<b>3770</b>	<b>14.22</b>

A diferencia de las pruebas de Marshall anteriores, en este caso para la estabilidad se ensayaron un total de 5 probetas. En el Cuadro 13, se observa como principal resultado una Estabilidad de Marshall promedio de 3770 [lbs] mientras que para el Flujo de Marshall un promedio de 14.22 [0.01"].

### 2. Gravedad específica bruta de la mezcla

**Cuadro 14 Resultados gravedad específica bruta de la MAC con 1.5% PET.**

No.	%	Peso neto muestra	Peso neto muestra sat.	Peso neto en agua	Volumen sin corregir	Factor de correc. por temperatura	Volumen corregido	Densidad briqueta	Vacíos individuales
1	4.00	1241.9	1244.0	742.9	501.1	1.0000	501.1	2.4783	4.21
2	4.00	1221.0	1223.8	730.1	493.7	1.0000	493.7	2.4732	4.41
3	4.00	1218.5	1221.8	732.8	489.0	1.0000	489.0	2.4918	3.69
4	4.00	1218.6	1220.7	730.7	490.0	1.0000	490.0	2.4869	4.04
5	4.00	1223.4	1225.8	732.1	493.7	1.0000	493.7	2.4780	4.22
							<b>Promedio</b>	<b>2.4817</b>	

### 3. Resumen de resultados

**Cuadro 15 Resumen resultados para MAC con 1.5% de PET.**

Propiedades de la mezcla	Unidad de medida	Resultados	Especificaciones
% de asfalto en mezcla	%	4.00	***
% Vacíos de aire - VA	%	4.08	3 a 5
% Vacíos rellenos de asfalto - VFA	%	67.2	65 a 75
% Vacíos de agregado mineral - VAM	%	12.45	> 13
Estabilidad Marshall	lb	3770	>1200
Fluencia Marshall	0.01"	14.2	8 a 16
Relación polvo /asfalto	-	2.05	0.6 a 1.6
Relacion estabilidad / flujo Marshall	lb/0.01"	265	150 a 275
Gravedad específica bruta de la mezcla - Gmb	g/cc	2.481	***
Gravedad específica Rice de la mezcla AASHTO T 209 - Gmm	g/cc	2.571	***

En el Cuadro 15, se observan los resultados encontrados para la mezcla modificada con 1.5% de PET. En este caso, destaca principalmente el aumento en la Estabilidad de Marshall a comparación de la mezcla tradicional. No obstante, el porcentaje de vacíos rellenos de agregado mineral no se encuentra en el rango establecido, así como la relación polvo asfalto que tampoco cumplía en la mezcla tradicional.

### F. Diseño de mezcla asfáltica en caliente con adición de 1.5% de Polipropileno (PP) por el Método de Marshall

#### 1. Estabilidad de Marshall

**Cuadro 16 Resultados de estabilidad y flujo para MAC con 1.5% PP.**

	Lectura micrómetro	Estabilidad (lb)	Volumen sin corregir	Factor de correc. por volumen	Estabilidad (lb)	Flujo (0.01")
1	356	3780	508.5	1.00	3780	13.8
2	340	3611	503.2	1.04	3755	13.8
3	381	4045	501.0	1.04	4206	13.2
4	325	3452	506.4	1.04	3590	13.6
5	331	3516	503.6	1.04	3656	14.4
<b>Promedio</b>	<b>347</b>	<b>3681</b>	<b>504.54</b>	<b>1.03</b>	<b>3798</b>	<b>13.76</b>

Al igual que en el caso del PET, en este caso para la estabilidad se ensayaron un total de 5 probetas. En el cuadro 16, se observa como principal resultado una Estabilidad de Marshall promedio de 3798 [lbs] mientras que para el Flujo de Marshall un promedio de 13.76 [0.01"].



## 2. Gravedad específica bruta de la mezcla

**Cuadro 17 Resultados gravedad específica bruta de la MAC con 1.5% PP.**

No.	%	Peso neto muestra	Peso neto muestra sat.	Peso neto en agua	Volumen sin corregir	correc. por temperatura	Volumen corregido	Densidad briqueta	Vacíos individuales
1	4.00	1225.4	1230.0	721.5	508.5	1.0000	508.5	2.4098	6.26
2	4.00	1222.5	1227.5	724.3	503.2	1.0000	503.2	2.4295	5.49
3	4.00	1222.3	1226.4	725.4	501.0	1.0000	501.0	2.4397	5.10
4	4.00	1220.6	1224.3	717.9	506.4	1.0000	506.4	2.4103	6.62
5	4.00	1219.7	1222.7	719.1	503.6	1.0000	503.6	2.4220	5.79
								Promedio	2.4223

## 3. Resumen de resultados

**Cuadro 18 Resumen resultados para MAC con 1.5% de PP.**

Propiedades de la mezcla	Unidad de medida	Resultados	Especificaciones
% de asfalto en mezcla	%	4.00	***
% Vacíos de aire - VA	%	5.77	3 a 5
% Vacíos rellenos de asfalto - VFA	%	57.6	65 a 75
% Vacíos de agregado mineral - VAM	%	13.62	> 13
Estabilidad Marshall	lb	3798	>1200
Fluencia Marshall	0.01"	13.8	8 a 16
Relación polvo /asfalto	-	2.14	0.6 a 1.6
Relacion estabilidad / flujo Marshall	lb/0.01"	276	150 a 275
Gravedad específica bruta de la mezcla - Gmb	g/cc	2.422	***
Gravedad específica Rice de la mezcla AASHTO T 209 - Gmm	g/cc	2.571	***

En el Cuadro 18, se observan los resultados encontrados para la mezcla modificada con 1.5% de PP. En este caso, al igual que con el PET, destaca principalmente el aumento en la Estabilidad de Marshall a comparación de la mezcla tradicional. No obstante, varios parámetros no cumplieron estos fueron: % vacíos de aire, % vacíos rellenos de asfalto, relación polvo asfalto y relación estabilidad/fluencia. A continuación, en la sección de comparación de resultados se discutirá de forma más amplia el significado de los resultados.

## G. Comparación resultados entre mezcla tradicional, mezcla con adición de 1.5% PET y mezcla con adición de 1.5% PP en Pruebas de Marshall

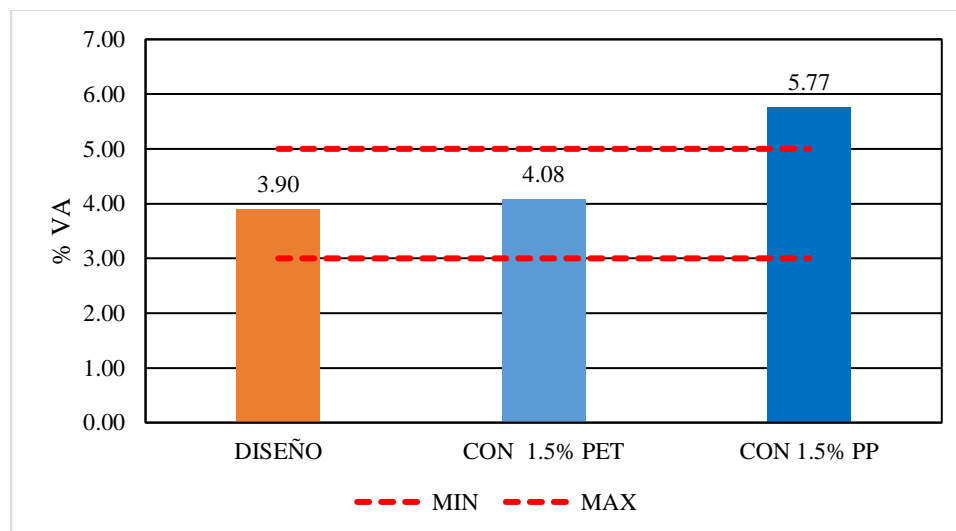
### 1. Cuadro resumen

Cuadro 19 Comparativa entre las diferentes MAC diseñadas.

Propiedades	Unidad de medida	Especificación		Diferencias		
		min	max	DISEÑO	CON 1.5% PET	CON 1.5% PP
% de asfalto en mezcla	%	3	8	4.00	4.00	4.00
% Asfalto absorbido	%	***	***	0.32	0.54	0.68
% Asfalto afectivo	%	***	***	3.68	3.46	3.32
% Vacios de aire - VA	%	3	5	3.90	4.08	5.77
% Vacios rellenos de asfalto - VFA	%	65	75	71.21	67.2	57.60
% Vacios de agregado mineral - VAM	%	13	-	13.52	12.45	13.62
Estabilidad Marshall	lb	1200	-	3304	3770	3798
Fluencia Marshall	0.01"	8	16	12.40	14.22	13.76
Relación polvo /asfalto	-	0.6	1.6	1.82	2.1	2.1
Relación estabilidad /flujo Marshall	lb/0.01"	120	275	266	265	276
Sensibilidad a la humedad (resis. retenida, estab.remanente)	-	***		***	***	***
Gravedad específica Bruta de la mezcla - Gmb	g/cc	***	***	2.526	2.482	2.422
Grav. específica Rice de la mezcla AASHTO T 209 - Gmm	g/cc	***	***	2.62	2.587	2.571
Grav. específica PP	g/cc	***			1.40	-
Grav. específica PET	g/cc	***			-	1.021

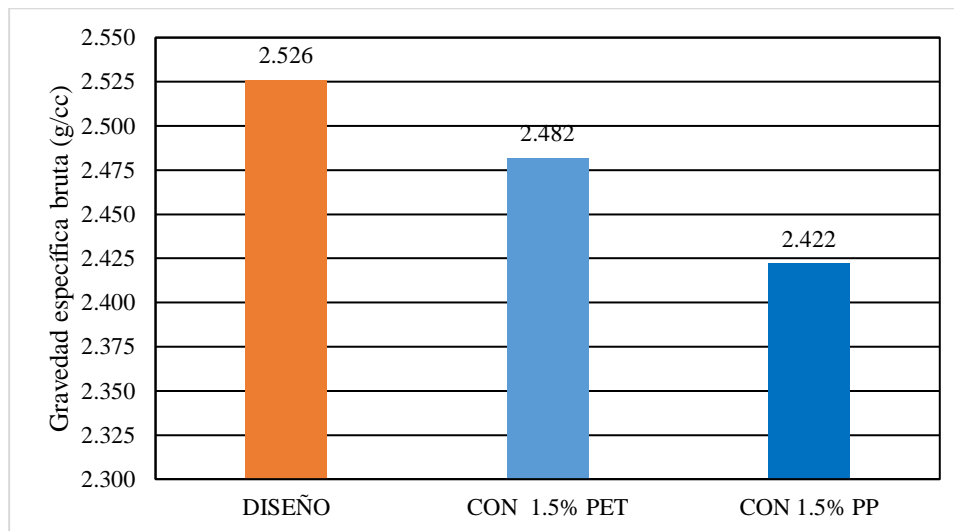
### 2. Discusión de resultados

Gráfico 11 Comparación % VA entre las MAC diseñadas.

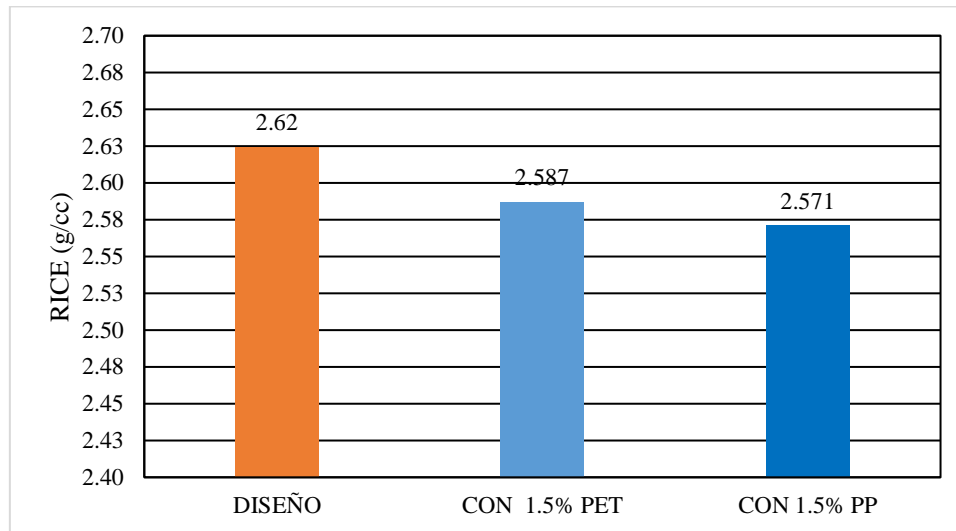


Al analizar detenidamente los resultados obtenidos, existen una gran variedad de aspectos destacables. En primer lugar, resulta necesario revisar el porcentaje de vacíos en general. Estos como tal se dividen en: vacíos de aire (VA), vacíos rellenos de asfalto (VFA) y vacíos de agregado mineral (VAM). En el caso de los vacíos de aire, estos tienen una gran influencia en la mezcla ya que, si el porcentaje es muy elevado, esto conlleva a mayores agrietamientos, mientras que valores muy bajos inducen a deformaciones permanentes. Un rasgo general en varias de las investigaciones consultadas (Jegatheesan et al., 2018; Correa & Sotero, 2021; Salazar, 2020 y Cañari, 2019) se observa que la introducción de PET y PP a la mezcla aumenta considerablemente los vacíos. Para explicarlo, es necesario comprender que la gravedad específica está muy relacionada con los vacíos de aire. Al introducir partículas de PET y PP en la mezcla resulta en un mayor volumen y menor densidad. Por tanto, este incremento en el volumen trae como consecuencia un volumen de aire mayor (Jegatheesan et al. ,2018).

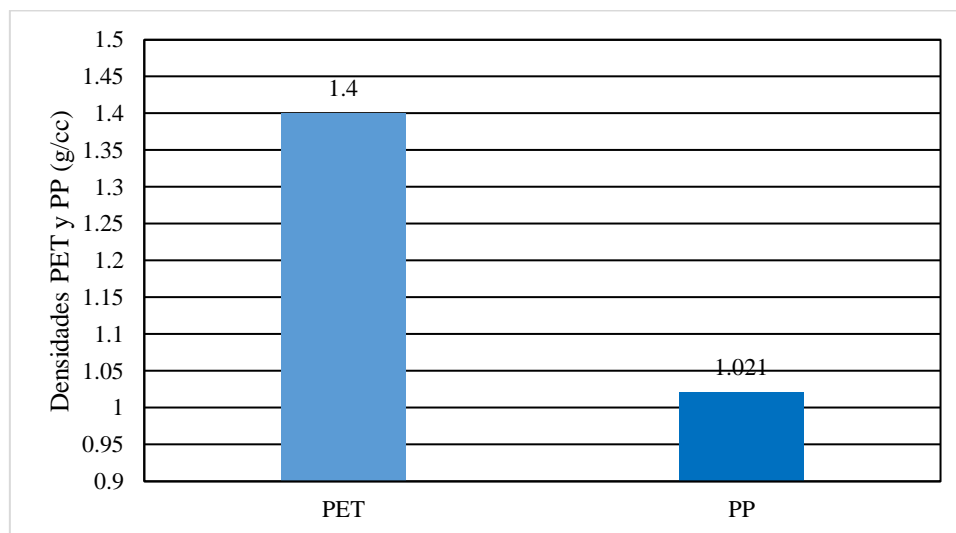
**Gráfico 12 Comparación gravedad específica bruta entre las MAC diseñadas.**



**Gráfico 13 Comparación gravedad específica RICE entre las MAC diseñadas.**



**Gráfico 14 Densidades de PET y PP implementado en las MAC modificadas.**

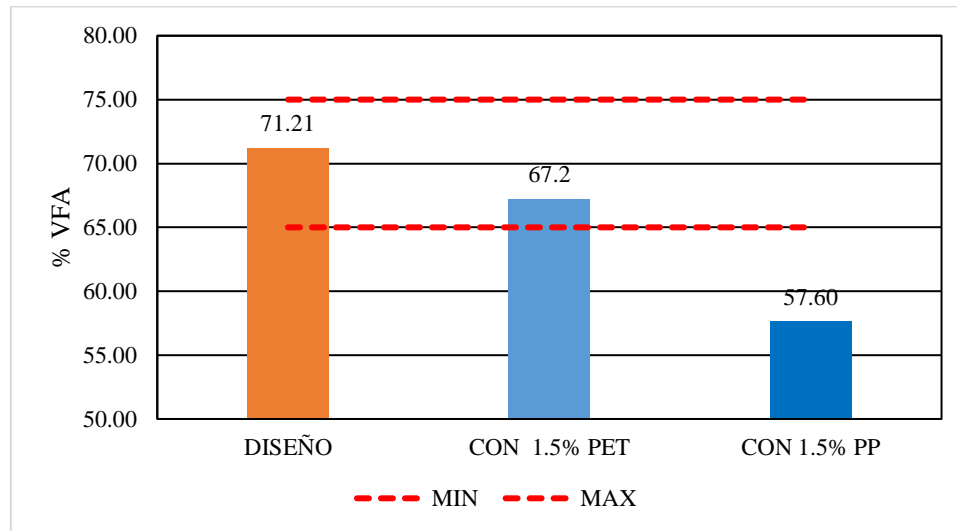




**Ilustración 16 Prueba para observar la diferencia de densidades entre PET y PP**

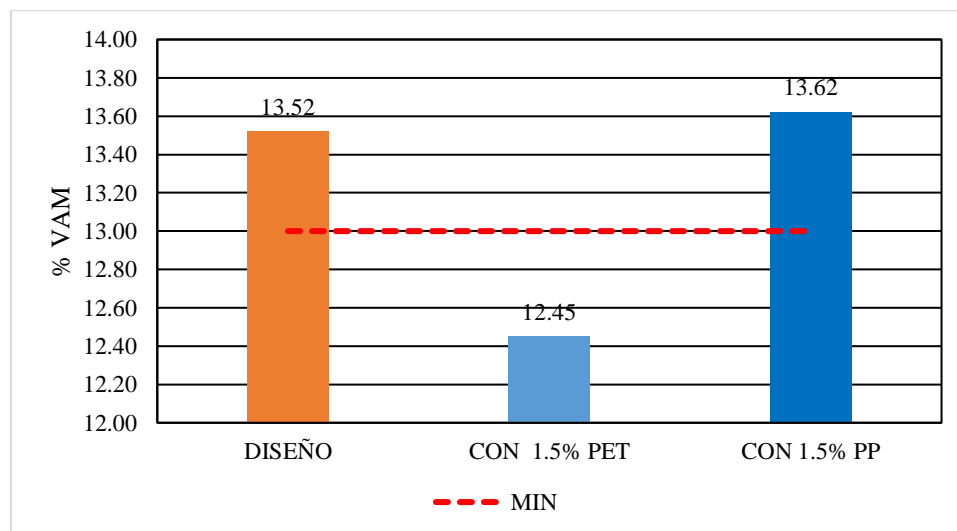
Ahora bien, esta tendencia anteriormente descrita se puede ver en el Gráfico 11. En donde tanto para PET como para PP existe un incremento en el porcentaje de vacíos de aire. Este aumento, se ve acompañado de la disminución en la gravedad específica de ambas mezclas modificadas, tanto bruta como de RICE, como se observa en los Gráficos 12 y 13. No obstante, el incremento de vacíos de aire en el PP es bastante brusco. En este caso, la diferencia de densidades entre ambos materiales juega un papel fundamental. Esto se evidencia de forma numérica en el Gráfico 14, en donde se aprecia como la gravedad específica del PET es bastante mayor a la de PP (aproximadamente 0.4 g/cc). Justamente este aspecto produce una menor densidad de la mezcla y mayores volúmenes de aire en la mezcla con 1.5% de PP. De igual forma, en la Ilustración 16 se puede observar esta diferencia de forma visual. El PET (partículas blancas) al ser más densas que el agua (densidad de 1 g/cc) se hunden mientras que el PP (partículas verdes) al tener una densidad muy similar al agua flota. En esta línea, se recomendaría para siguientes investigaciones probar mezclas con un porcentaje de PP más bajo o con un mayor contenido de asfalto. Por el contrario, a pesar de existir un incremento en los vacíos, la mezcla con 1.5% de PET está dentro de los parámetros establecidos por el *Libro Azul de Caminos*.

**Gráfico 15 Comparación % VFA entre las MAC diseñadas.**



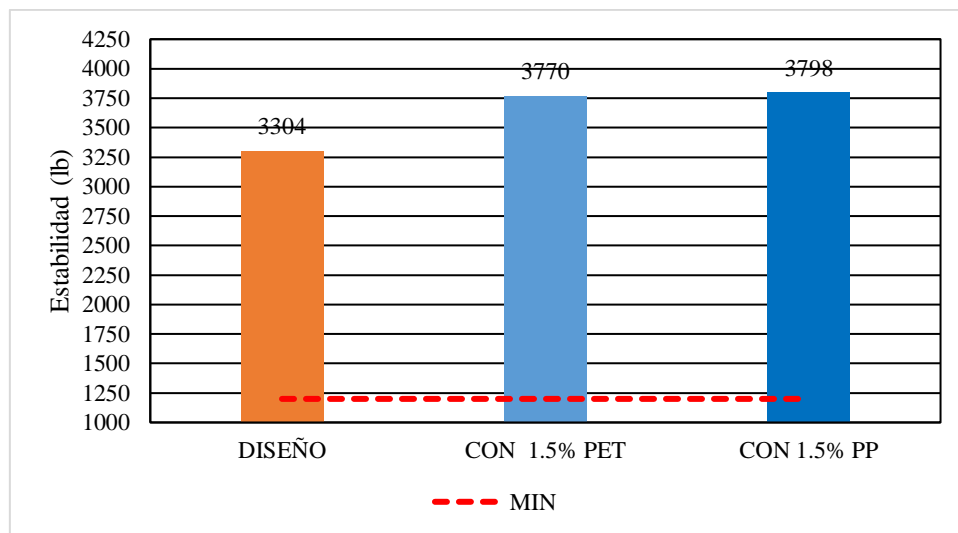
En contraposición a lo mencionado anteriormente, en el Gráfico 15 se observa cómo el porcentaje de volúmenes rellenos por asfalto se ve reducido con la adición de ambos polímeros. Precisamente, esta característica también es común en las investigaciones recapituladas anteriormente. Esto debido a que dicha propiedad es inversamente proporcional a los vacíos de aire (Jegatheesan et al., 2018). De ahí que, al igual que para los vacíos de aire, esta propiedad refuerza el hecho de que para la mezcla asfáltica con 1.5% de PP se debería de aumentar el contenido de asfalto.

**Gráfico 16 Comparación % VAM entre las MAC diseñadas.**



Caso muy particular se observa en el Gráfico 16, teniendo en cuenta que tanto en la investigación de Jegatheesan et al. como en la de Cañari, se observa que la implementación de PET y PP aumentan los vacíos de agregado mineral. No obstante, en la mezcla de PET este parámetro bajó de forma considerable. Por definición, los vacíos en el agregado mineral son los espacios de aire que existen entre las partículas del agregado en una mezcla compactada, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto efectivo (Benavides, 2016). En el Cuadro 16, se observa exactamente como el asfalto efectivo en la mezcla con 1.5% PET se reduce. Es por ello, que, en este contexto, se explica que el volumen de agregado mineral haya disminuido notablemente en la mezcla con PET. Aun así, debido a que añadir asfalto reduce los vacíos de aire, consiguientemente, se recomendaría en este caso una reducción del contenido de PET en la mezcla.

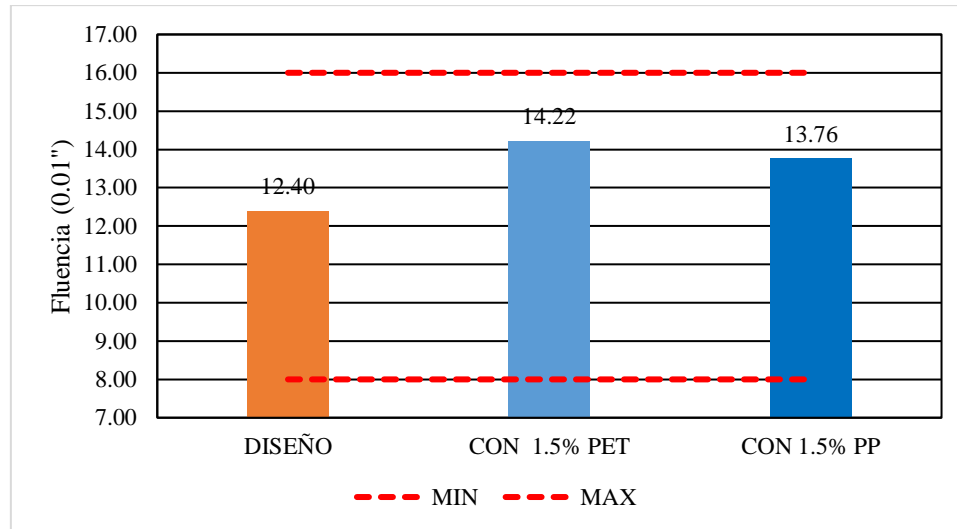
**Gráfico 17 Comparación estabilidad de Marshall entre las MAC diseñadas.**



Ya comentado las diferentes relaciones anteriores es importante discutir la estabilidad de Marshall, la fluencia y la relación entre estas. Por una parte, la estabilidad de Marshall es un aspecto que, anteriormente en la sección de “Estado del arte e investigaciones previas”, se observó que al implementar ya sea PET o PP suele aumentar. Esta propiedad se evidencia en el Gráfico 17 en donde se puede contemplar que, a comparación de la mezcla tradicional, las mezclas con PET y PP tienen una estabilidad considerablemente más alta. No obstante, a pesar de que esto parece una ventaja a simple

vista, cabe destacar que la trabajabilidad de la mezcla se ve reducida por este aumento (Jegatheesan et al., 2018).

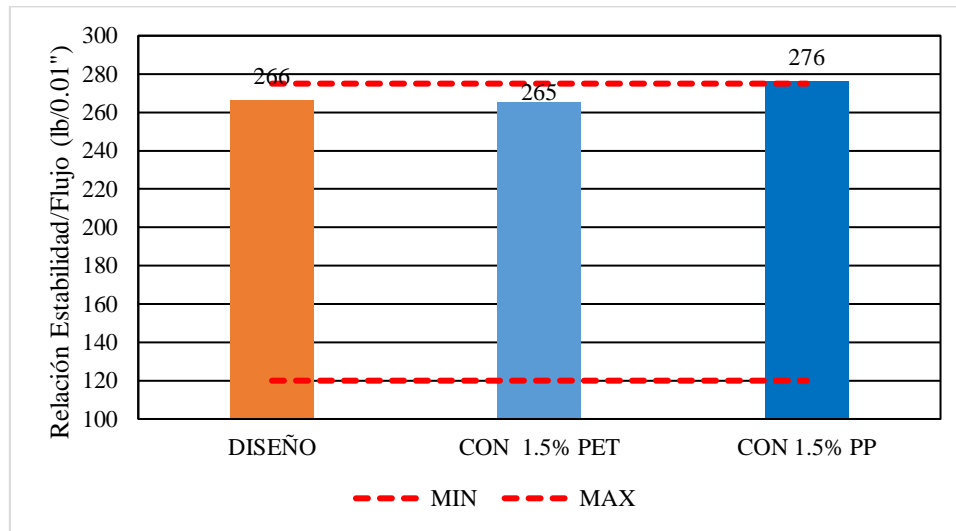
**Gráfico 18 Comparación fluencia de Marshall entre las MAC diseñadas.**



Por esto mismo, es necesario revisar tanto los parámetros de fluencia y, más importante, la relación estabilidad/fluencia. Al igual que con la estabilidad, la fluencia es otra de las características que aumenta al adicionar PET y PP a la mezcla asfáltica. Esta contribución, sin embargo, va reduciéndose mientras el porcentaje implementado aumenta. Esto debido a que tanto PET como el PP aumentan rigidez, aspecto mencionado anteriormente. En términos de flujo todas las mezclas cumplieron tal y como se percibe en el Gráfico 18.

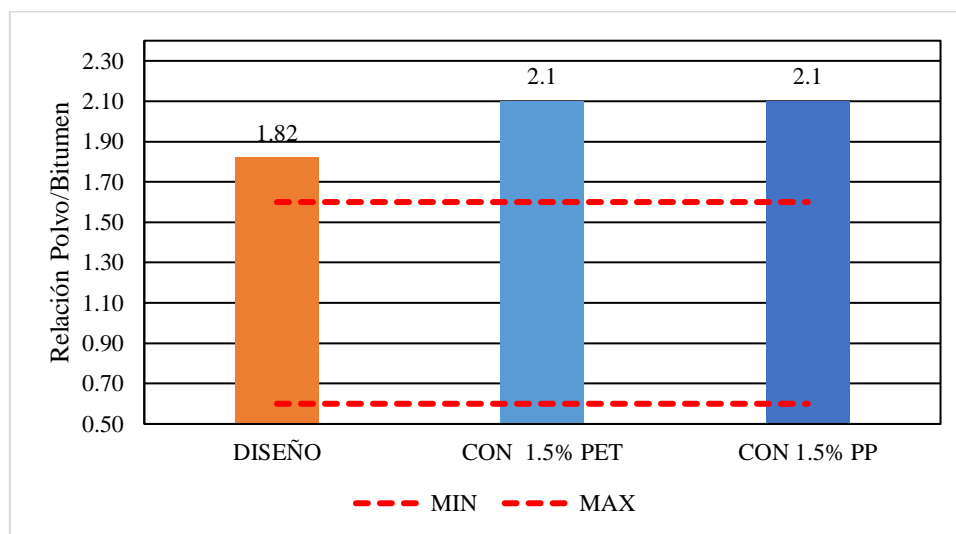


**Gráfico 19 Comparación rel. estabilidad/ fluencia entre las MAC diseñadas.**



Con respecto a la relación estabilidad/fluencia, tal y como se aprecia en el Gráfico 19 se tiene problemas nuevamente con la mezcla con 1.5% de PP. Este dilema se da ya que la relación supera los 275 que es el máximo de la norma. El principal inconveniente que tiene una mezcla con una relación estabilidad/fluencia alta es que esta es muy rígida y, por tanto, muy susceptible a fisurarse. Nuevamente para el PP esta propiedad evidencia que es necesario aumentar el contenido de asfalto. Esto debido a que para mejorar dicha relación es necesario mejorar la ductilidad de la mezcla, en consecuencia, es necesario aumentar el contenido de asfalto.

**Gráfico 20 Comparación rel. polvo/Bitumen entre las MAC diseñadas.**

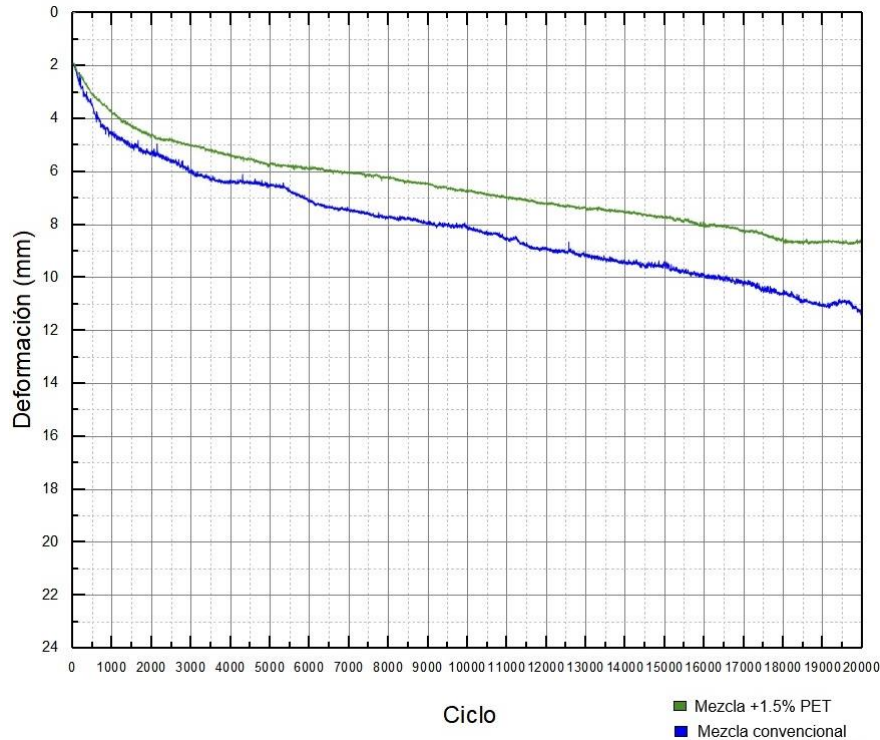


En cuanto a la relación polvo/asfalto de las mezclas, el Gráfico 20 evidencia que ninguna de estas cumple con lo establecido en el *Libro Azul de Caminos*. Una relación polvo/asfalto alta puede deberse a dos factores principales: un alto porcentaje del agregado pétreo pasando el tamiz no. 200 o poco asfalto efectivo (Benavides, 2016). Cabalmente, dichas circunstancias se dan en las mezclas diseñadas ya que el porcentaje de finos es bastante elevado y el contenido de asfalto, en general, de todas las mezclas es bastante bajo. No obstante, en la investigación realizada por parte de Benavides, M. en el año 2016 analizando el efecto de una variación por encima de la norma de la relación polvo/asfalto concluye que realmente dicha propiedad esta desligada del desempeño y durabilidad de la mezcla como tal (Benavides, 2016).

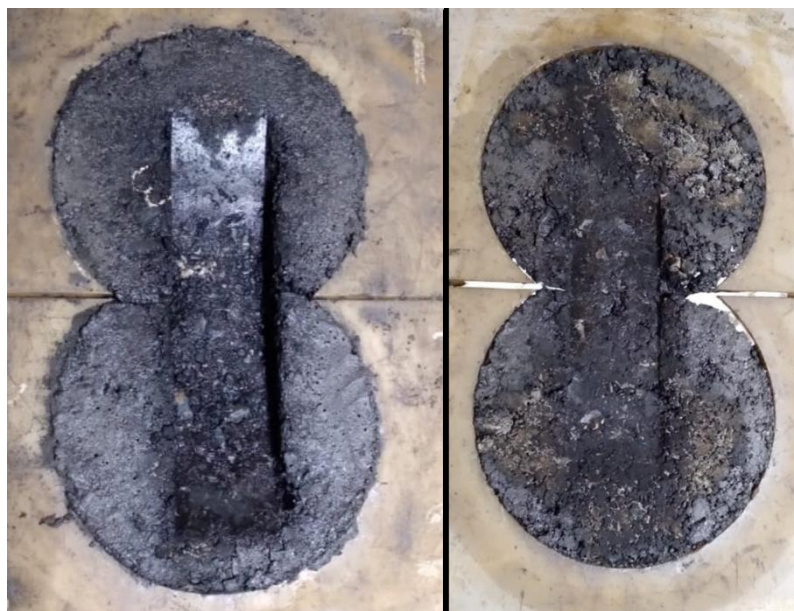
Finalmente, es necesario mencionar cuál de las dos mezclas modificadas se ensayará en la Rueda de Hamburgo. Debido al comportamiento mostrado tanto en los apartados volumétricos como en los respectivos a rigidez y deformación, se selecciona finalmente la mezcla modificada con 1.5% de PET. Para la mezcla modificada con 1.5% de PP se recomienda seguir la investigación aumentando el contenido de asfalto debido a los valores fuera de la normativa obtenidos en: porcentaje de vacíos de aire, vacíos rellenos de asfalto, relación polvo/asfalto y relación estabilidad/flujo.

## H. Resultados prueba Rueda Cargada de Hamburgo

Gráfico 21 Resultados Rueda de Hamburgo de las MAC diseñadas.



Al observar los resultados en el Gráfico 21 se destacan varios aspectos. Uno de los puntos más importantes recae en que se observa un mejor comportamiento de la mezcla con 1.5% PET a comparación de la convencional. Este resultado se debe tomar con pinzas, principalmente esta diferencia se atribuye a la variabilidad entre las probetas. Realmente, la tendencia en general sería a un comportamiento similar entre ambas mezclas y para argumentar que el PET da una mejora se debería de seguir investigando con más probetas para así observar una tendencia como tal. A pesar de que las distintas especificaciones sobre la Rueda de Hamburgo no llegan a un consenso respecto a cuál es la deformación máxima a los 20,000 ciclos, en varios Estados (Texas, Illinois y California) se establece que esta no debe superar los 12.5 mm (Martínez, 2018). En consecuencia, se puede afirmar que ambas mezclas cumplen con el ensayo y que muestran un desempeño bastante similar puesto que las deformaciones finales luego de 20,000 ciclos son de aproximadamente 9 mm (mezcla con 1.5% PET) y 11 mm (mezcla tradicional).



**Ilustración 17** Probetas de MAC tradicional al finalizar la Rueda de Hamburgo.



**Ilustración 18** Probetas de MAC con 1.5% de PET al finalizar la Rueda de Hamburgo.

Ahora bien, otro aspecto importante del ensayo de Rueda de Hamburgo es el análisis del comportamiento de las pastillas al finalizar la prueba. En este proceso, existe un concepto clave: la separación del ligante asfáltico y el agregado pétreo (stripping). Y es que dos de las propiedades que frecuentemente se evalúa en una mezcla asfáltica y que resultan determinantes son la cohesión y la adhesión. Ambos atributos se caracterizan por el nivel de interacción fisicoquímica entre el agregado pétreo y el ligante. Uno de los agentes más

perjudiciales para esta unión asfalto-agregado es el agua, ya que cuando esta entra en contacto con la mezcla, por ser más afín al agregado pétreo, ocupa el lugar del ligante lo que ocasiona que la película de asfalto se desplace y, consiguientemente, se separe del agregado (Gracia & Pardo, 2012). Este fenómeno se conoce como stripping o desvestimiento y puede tener consecuencias graves en la mezcla ya que se pierde adhesividad y/o cohesión lo que provoca el desprendimiento de los agregados pétreos, lo que puede llevar a un fisuramiento temprano en la mezcla (Orozco, 2019).

Justamente, en la Rueda de Hamburgo se producen condiciones que evidenciarían fallas de este tipo al estar las probetas sumergidas en agua a 50°C durante todo el ensayo. No obstante, tanto en la Ilustración 17 como en la 18, se puede apreciar que las mezclas no muestran mucho desvestimiento (poco o leve) puesto que el agregado no se encuentra tan expuesto. Asimismo, en ambas mezclas se contempla una deformación canalizada. Esto es muy positivo, considerando que, de no ser así, la probeta quedaría del todo destruida. Por todo ello, se evidencia que en el análisis de imágenes las mezclas muestran un buen comportamiento en aspectos relacionados con la cohesión y adhesión entre agregados y ligante asfáltico.

## I. Análisis de costos de materiales

Como aproximación a un análisis de prefactibilidad del proyecto, se realizó un análisis de costos de las materias primas. Para ello, primero se establecieron los costos de las materias primas en donde para tener estos en términos de la moneda local, quetzal (Q), en donde a la fecha en que se realizó el análisis el cambio por dólar estadounidense (\$) fue de 7.8 Q por \$. A continuación, se presentan los valores utilizados para el posterior cálculo del costo por tonelada métrica de MAC:

**Cuadro 20 Costo de materias primas**

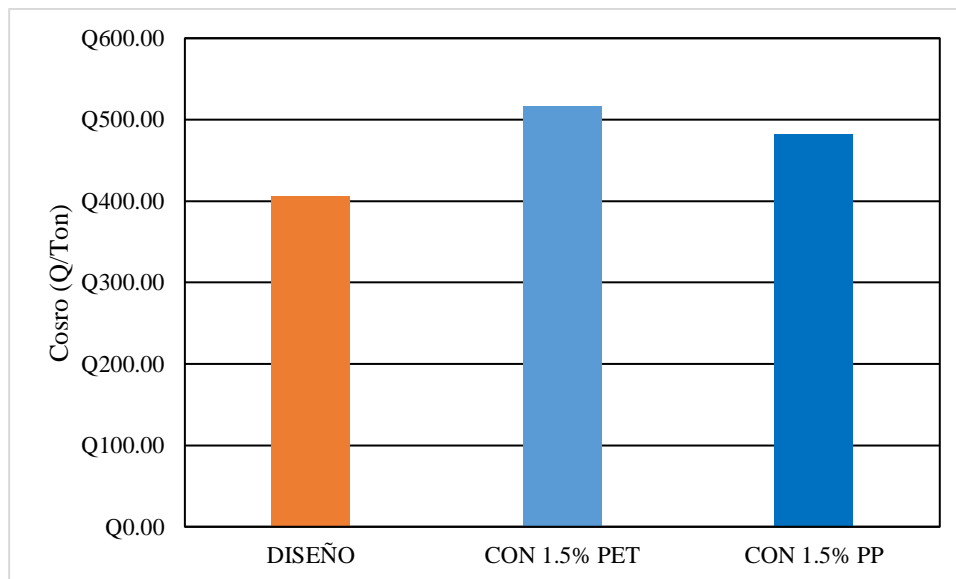
<b>Materia prima</b>	<b>Precio</b>
Bitumen asfáltico AC-30	28.83 Q/Gal
Agregado grueso 3/4"	160 Q/m <sup>3</sup>
Agregado intermedio 3/8"	160 Q/m <sup>3</sup>
Agregado fino 1/4" a 0	180 Q/m <sup>3</sup>
Resina PET	7791.57 Q/ton
Pellet PP	5454.1 Q/ton

De manera resumida, se realizó el cálculo del costo de los materiales para cada una de las MAC diseñadas (tradicional, 1.5% de PET y 1.5% de PP). Es importante destacar que estos costos no toman en cuenta las recomendaciones que previamente se realizaron en el trabajo ya que para la mezcla con 1.5% de PP se recomendaba un mayor contenido de asfalto mientras que para la mezcla con 1.5% PET se aconsejaba reducir el contenido de dicho polímero. Por ello, en estos costos, se utiliza el contenido de asfalto óptimo encontrado en el diseño Marshall de la mezcla convencional (4%). A continuación, se presentan resultados asociados a los costos de las materias primas requeridas para la fabricación de una tonelada métrica de las MAC diseñadas:

**Cuadro 21 Costo de materiales por tonelada métrica de las MAC diseñadas.**

<b>Resumen del costo de materiales por tonelada de mezcla</b>			
<b>Mezcla</b>	<b>Costo</b>	<b>Diferencia</b>	<b>% Diferencia costo</b>
Diseño	Q405.68	-	-
Con 1.5% PET	Q516.22	Q110.54	27.25%
Con 1.5% PP	Q482.56	Q76.88	18.95%

**Gráfico 22 Comparativa costo por tonelada de MAC diseñadas**



Al observar los resultados tanto del Cuadro 21 como del Gráfico 22, se observa que la introducción de PET y PP a la mezcla incrementa los costos de materiales en 27.25% y 18.95% respectivamente. Esto sucede principalmente debido a que los costos de ambos materiales de manera comercial son bastante elevados a comparación de los agregados pétreos como se puede observar en el Cuadro 20. No obstante, es necesario considerar que estos costos pueden ser reducidos en compras en grandes escalas. Asimismo, las mezclas en donde se adicionan los polímeros agregados tienen un valor agregado ya que implementan un material reciclado. En Europa, en el año 1997 nació el concepto de impuestos ambientales con el objetivo de incentivar a la industria a innovar en la sostenibilidad entre otros aspectos. De esta forma, se castiga a las empresas que causan efectos negativos en el ambiente por los productos que comercializan (Iberdrola, 2019). Teniendo en cuenta este panorama, la evolución lógica de las metodologías actuales de diseño es respecto a considerar la reutilización de materiales y ser más sostenible. En este contexto, es que se puede justificar el aumento de costos en materias primas ya que las mezclas modificadas tienen un valor agregado.

## VII. CONCLUSIONES

- Al realizar una revisión de los porcentajes implementados de tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP) en investigaciones previas se observó que estos oscilaban entre 1 y 3% en peso de agregados para PET y entre 0.4 y 0.6% en peso de agregados para PP. Debido a que el principal motor del presente trabajo del graduación se relacionaba con realizar un aporte significativo, en donde se adicione una mayor cantidad de desechos, se propuso finalmente porcentajes de adición de 1.5% en peso de agregados para ambos polímeros. En consecuencia, se puede decir que se logró definir los porcentajes de PET y PP a implementar en la mezcla asfáltica.
- Durante el proceso de selección de agregados pétreos y ligante asfáltico, se utilizó un diseño típico tradicional de mezcla tipo D. Para ello, se debía realizar un ajuste en la curva granulométrica en donde se establece un porcentaje participante para cada uno de los agregados (grueso, intermedio y fino). Finalmente, se estableció una composición de agregados como se menciona a continuación: 35% agregado grueso de 3/8", 22% agregado intermedio de 3/8" y 43% agregado fino. Asimismo, se seleccionó un ligante asfáltico tipo AC-30 UNOPETROL, que posteriormente, en el diseño Marshall se definió el contenido óptimo para las mezclas como el 4%. Por tanto, se logró seleccionar de manera exitosa los agregados pétreos y el ligante asfáltico según lo establecido en la sección 401 del Libro Azul de Caminos.
- Luego de realizar el ensayo de Rueda de Hamburgo sobre la mezcla modificada con 1.5% de PET y la mezcla tradicional, se observó que la mezcla con PET muestra deformaciones muy similares a las que presenta la mezcla convencional luego de 20,000 ciclos. Estas deformaciones resultaron menores en la mezcla que contenía un 1.5% de PET, aunque, esta mejora se atribuye realmente a diferencias leves entre las probetas. Asimismo, el análisis de las probetas luego del ensayo, no muestran



seña de una afectación del PET en la compatibilidad del ligante asfáltico con el agregado pétreo al no verse signo de falta de adhesividad y cohesión en la mezcla. No obstante, debido a cuestiones económicas, el estudio solo pudo priorizar la mezcla modificada con PET y PP que diese mejores resultados en las pruebas de Marshall, en donde se seleccionó la modificada con PET. De ahí que, en la mezcla con 1.5% de PP únicamente se obtuvieran los valores de las pruebas de Marshall.

- Al analizar los resultados entre la mezcla modificada con 1.5% de PET y la mezcla tradicional, se destacan varios aspectos. En primer lugar, se observó que la implementación del PET aumenta los vacíos de aire ligeramente producto de que este, al ser un material más ligero, reduce la gravedad específica de la mezcla a comparación de la tradicional. Por el contrario, los vacíos rellenos de asfalto y los vacíos de agregado mineral se reducen en la mezcla modificada debido a que el asfalto efectivo se ve considerablemente reducido. No obstante, existen parámetros como la estabilidad y la fluencia que mejoran al introducir el PET ya que este material aporta rigidez a la mezcla. Este aporte en estabilidad se complementa con una relación estabilidad/fluencia similar a la de la mezcla convencional. En forma global, y añadiendo los resultados vistos en la Rueda de Hamburgo, se puede comentar que se logró determinar que bajo las proporciones definidas se obtuvo una mezcla asfáltica balanceada.
- Finalmente, luego de realizar el cálculo de los costos de las materias primas se destaca que la introducción de PET y PP aumenta el costo de la mezcla a comparación de la tradicional en un 27.25% y 18.95% respectivamente. El principal motivo de este incremento recae en la diferencia de precios de ambos polímeros a comparación de los agregados pétreos que son la fracción que sustituyen en la mezcla. No obstante, la adición de PET y PP a la mezcla le da un valor agregado ya que da un nuevo uso a los desechos plásticos que se generan en la sociedad. Si tenemos en cuenta que en las últimas décadas han surgido medidas para paliar la crisis de contaminación como los impuestos verdes que castigan métodos de producción poco sostenibles, entonces la mezcla adquiere un valor agregado. Por todo esto, se concluye que se alcanzó el objetivo planteado respecto a desarrollar una comparativa de costos entre las mezclas diseñadas.

## VIII. RECOMENDACIONES

### A las instituciones académicas:

- En términos generales, se recomienda continuar con la investigación sobre los efectos de implementar polímeros reciclados a una mezcla asfáltica. Por un lado, se logró observar que es posible realizar una mezcla balanceada y en donde existe un gran potencial para dar uso a la gran cantidad de desechos generados dentro del país. En este contexto, gran parte de la literatura consultada se limita únicamente a realizar un diseño Marshall y, de ahí que, resulte necesario complementar este diseño con ensayos como Rueda de Hamburgo, Ensayo de Tracción Indirecta y Probeta Semi-Circular con Corte Inducido. Esto debido a que dichas pruebas aportan información muy importante y que complementan el diseño como tal.
- Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda aumentar el contenido de asfalto en la mezcla con 1.5% de PP. Por un lado, en las propiedades volumétricas, este aumento se explica debido al alto porcentaje de vacíos de aire y, por el contrario, el bajo porcentaje de vacíos rellenos de asfalto. Por el otro lado, en la estabilidad y fluencia se manifiesta una relación entre dichos parámetros muy alta lo cual resulta en una mezcla muy fisurable.
- Asimismo, para la mezcla con adición de PET se recomienda continuar la investigación con porcentajes menores o iguales a 1.5%. Ya en la mezcla tradicional se observa un valor elevado en la relación polvo/asfalto producido por un alto contenido de finos en la combinación propuesta del agregado pétreo. No obstante, añadir un mayor porcentaje de ligante asfáltico en la mezcla suele ser contraproducente ya que otros parámetros se salen de lo establecido en la normativa. Es por ello, que la recomendación en este caso sería continuar con las pruebas para observar si este fenómeno se presenta de manera recurrente independiente del tipo de agregado pétreo implementado en las pruebas.

## **A estudiantes que deseen continuar con la investigación:**

- Se recomienda que al investigar el polímero que desean ensayar realicen un sondeo de las empresas recicladoras de la ciudad. Para conseguir el material, muchas de estas empresas no venden a personas particulares, sino que solo a mayoristas. En el caso de esta investigación, fue posible realizar el trabajo investigativo producto de una donación de la resina PET y del PP en pellet por parte de Interfisa.
- Finalmente, de la misma forma que en la recomendación anterior, se recomienda analizar de forma detenida las propiedades del polímero que deseen implementar a la mezcla asfáltica. Debido a que estas varían entre polímeros, dependiendo de cual plástico se implemente el método de adición va a variar. El PET, por un lado, al tener un alto punto de fusión, se añade al finalizar la mezcla y forma parte del agregado pétreo. El PP es variable, ya que cuando pasa por el proceso de reciclado, aumenta su punto de fusión y se añade como parte del agregado pétreo. Caso contrario, en condiciones vírgenes, este se puede fundir con el ligante asfáltico y aporta fluidez a la mezcla. Por consiguiente, dependiendo del material que se logre conseguir para realizar los ensayos se proponen los porcentajes implementados.

## **A Dirección General de Caminos:**

- Se recomienda actualizar la normativa vigente respecto al diseño de carreteras. A lo largo de la investigación, se utilizó como referencia el *Libro Azul de Caminos* publicado en el año 2001 por lo que han pasado más de 20 años desde su publicación. Luego de realizar el Diseño Marshall, se observó que en las mezclas diseñadas tenían una relación polvo/asfalto fuera de los parámetros establecidos por la norma. No obstante, al realizar el Ensayo de Rueda de Hamburgo se observa un desempeño óptimo tanto de la mezcla modificada como de la tradicional. Como se detalla a lo largo del trabajo, esta prueba evalúa la mezcla en estados críticos (saturado, % de vacíos de 7% y a 50 °C) y que evidencia fallas prematuras producto de una falta de compatibilidad entre el ligante asfáltico y los agregados pétreos. El objetivo primordial de una normativa es establecer parámetros y requisitos de diseño que cumplan con las demandas que ocurren en la realidad. Por todo esto, se

hace un llamado a las organizaciones gubernamentales a actualizar las especificaciones actuales en un documento que se adapte a las nuevas metodologías de diseño y tecnologías que han surgido en tiempos recientes.

## IX. BIBIOGRAFÍA

AASHTO. (2004). *Standard specification for viscosity-graded asphalt cement*. ASTM

Aranda Böhm, J.A. (2017). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente utilizando ensayo de tracción indirecta*. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Obras Civiles.

Archila de Sánchez, M. (2021). El manejo de los desechos sólidos: una prioridad pendiente en Guatemala. Recuperado de Agexport Hoy: <https://agexporthoy.export.com.gt/sectores-de-exportacion/sector-servicios/el-manejo-de-los-desechos-solidos-una-prioridad-pendiente-en-guatemala/>

Arias Bracho, G. E. (2016). *Evaluación de factores de equivalencia y sus efectos en la reducción de la vida útil en las estructuras de los pavimentos de la vía Barranquilla Ciénaga*.

Arteaga Villamarín, J. F. (2018). *Análisis del comportamiento de la base-cemento para pavimentos con adición de residuos PET reciclado*.

Arulrajah, A., Yaghoubi, E., Wong, Y. C., & Horpibulsuk, S. (2017). Recycled plastic granules and demolition wastes as construction materials: Resilient moduli and strength characteristics. *Construction and building materials*, 147, 639-647.

Benavides Solera, M. A. (2016). *Efecto de la variación de la relación polvo/asfalto sobre la durabilidad de mezclas asfálticas*.

Buruiana, D. L., Georgescu, P. L., Carp, G. B., & Ghisman, V. (2023). Recycling micro polypropylene in modified hot asphalt mixture. *Scientific Reports*, 13(1), 3639.

Caicedo, C., Crespo-Delgado, L. M., Cruz-Rodríguez, H. D. L., & Álvarez-Jaramillo, N. A. (2017). Propiedades termo-mecánicas del Polipropileno: Efectos durante el reprocesamiento. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18(3), 245-252.

Cal Noreste. (2019). ¿Sabes que es la cal hidratada y sus usos? Recuperado de: <https://www.calnoreste.com/sabes-que-es-la-cal-hidratada-y-sus-usos/>

Cañari Otero, C. (2019). *Comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica en caliente con adición de fibras de polipropileno*.

Cárdenas Grisales, J. (2002). *Diseño Geométrico de Carreteras*. ECOE Ediciones.

Cardona Moncada, V. H., López Lara, T., Horta Rangel, J. M., & Hernández Zaragoza, J. B. (2023). Estabilidad y flujo en una mezcla asfáltica con sustitución parcial en el agregado pétreo por desechos de toba volcánica. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 24(1).

Cervantes Calvo, V., & Sequeira Rojas, W. (2014). *Consistencia de los diseños de mezcla según la metodología Marshall*.

Colomo Ruiz, N. R. (2013). *Ingeniería del reciclado en envases de tereftalato de polietileno (PET)*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Coronado Iturbide, J. (2002). *Manual centroamericano para diseño de pavimentos*.

Correa Gonzales, J. F., & Sotero Yengle, C. D. (2021). *Efecto del PET y polipropileno reciclado en la resistencia, impermeabilidad y flexión de pavimentos flexibles*.

De la Riva del Valle, J. (2016). *Estudio de prefactibilidad para la aplicación de nano fibras y nanotubos de carbono (CNTF) en pavimentos de concreto asfálticos e hidráulico*. Universidad del Valle de Guatemala.

Delbono, H. L., & Gullino, N. E. (2020). Ensayo a fatiga, implementando la Semi probeta (SCB), sobre mezclas asfálticas con diferentes modificadores del cemento asfáltico. *Ingenio Tecnológico*, 2.

Dirección General de Caminos. (2001). *Especificaciones generales para construcción de puentes y carreteras*.

Dirección General de Caminos. (2010). *Reglamento para el control de pesos y dimensiones de vehículos automotores de carga y sus combinaciones*. Guatemala.

Djamaluddin, A. R., Pasra, M., & Arsyad, A. (2021). Strength and toughness characteristics of AC-WC mixture containing PET and PP plastic waste under static compression. *GEOMATE Journal*, 20(78), 20-27.

eadic. (2016). Historia del uso de asfalto. Recuperado de: <https://eadic.com/blog/entrada/historia-del-uso-de-asfalto/>

Envaselia. (2018). ¿Qué es el polipropileno?. Recuperado de: <https://www.ensavelia.com/blog/que-es-el-polipropileno-id13.htm>

Ferdaus, R., Masri, K. A., & Ramadhansyah, P. J. (2022). Sustainable Use of Polymer in Asphalt Mixture: A Review. *CONSTRUCTION*, 2(2), 12-21.

Flores Flores, M., Delgado Alamilla, H. & Gómez López, J.A. (2018). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo*. Recuperado de: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt568.pdf>

FUNDESA. (2021). *Infraestructura vial para la recuperación económica*. Recuperado de: [https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Foro\\_Ley\\_de\\_Infraestructura\\_Vial.pdf](https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Foro_Ley_de_Infraestructura_Vial.pdf)

García Morales, A. R. (2015). *Diseño de pavimento asfáltico por el método AASHTO-93 empleando el software DISAASHTO-93*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/7544>.

García, O. (2022). Video: The Ocean Cleanup muestra cómo funciona interceptor que evita que toneladas de basura lleguen al río Motagua. Recuperado de Prensa Libre: <https://www.prensalibre.com/guatemala/comunitario/video-the-ocean-cleanup-muestra-como-funciona-el-interceptor-que-evita-que-toneladas-de-basura-lleguen-al-rio-motagua-breaking/>

Garnica Anguas, P., Delgado Alamilla, H., Gómez López, J. A., Alonso Romero, S., & Alarcón Orta, H. A. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Publicación técnica, (246).

Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Publicación técnica, (267).

Flores, M. (2021). Sigue incrementándose el parque vehicular en Guatemala. Recuperado de Ministerio de Gobernación: <https://transito.gob.gt/sigue-incrementandose-el-parque-vehicular-en-guatemala/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20el%20ONSET%2C%20hasta%20mayo,912%2C%20un%204.50%25%20m%C3%A1s.>

Gracia Huérfano, C.A. & Pardo Ríos, S.J. (2012). *Determinación del fenómeno de stripping en mezclas asfálticas porosas preparadas con asfalto base de similar penetración y proveniente de Colombia y Venezuela*. Universidad Piloto de Colombia. Bogotá, Colombia.

Guajardo, A. B., Najar, L.E., Prósperi, S. B. & Molina, M. G. (2000). Propiedades de los plásticos reciclados. Recuperado de Estructplan: <https://estrucplan.com.ar/propiedades-de-los-plasticos-reciclados/>

Hilton, A., & Francia, N. (2012). *Diseño y conservación de pavimentos rígidos*.

Iberdrola. (2019). Impuestos verdes. Recuperado de: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/impuestos-verdes-o-ambientales>

Infinitia. (2021). Elastómeros: qué son, tipos y aplicaciones. Recuperado de: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/elastomeros-que-son-tipos-y-aplicaciones/>

Infinitia. (2021). Reología y propiedades reológicas de los materiales. Recuperado de: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/reologia-y-propiedades-reologicas-de-los-materiales/>

Instituto Nacional de Estadística. (2022). *Indicadores de accidentes de tránsito: Número de accidentes de tránsito por departamento*. Recuperado de: <https://www.ine.gob.gt/ine/estadisticas/bases-de-datos/accidentes-de-transito/>



Jegatheesan, N., Rengarasu, T. M., & Bandara, W. M. K. R. T. W. (2018). Effect of polyethylene terephthalate (PET) fibres as binder additive in hot mix asphalt concrete. *Annual Sessions of IESL*, 175-182.

Leiva Villacorta, F. (2006). *Nueva guía de diseño mecánica-empírica para estructuras de pavimento (Vistazo a la guía 2002, Proyecto NCHRP I 37A)*.

Lomas, J. (2022). *UNE-EN 12697-44:2011 Propagación de fisura por el ensayo de flexión con una probeta semicircular*.

Lysyannikov, A. V., Egorov, A. V., Lysyannikova, N. N., Shram, V. G., Kovaleva, M. A., Lynev, A. S., & Kaizer, Y. F. (2019). Polymer materials from recycled plastic in road construction. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1399, No. 4, p. 044064). IOP Publishing.

Martínez Flores, E. L., & Montañez Munar, J. (2021). *Estudio de lechadas asfálticas para pavimentos con la incorporación de residuos de plástico tipo PET*.

Martínez Tapia, I. G. (2018). *Caracterización de Mezclas Asfálticas para el Uso en Recapados Utilizando el Ensayo de Rueda de Carga de Hamburgo*. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.

Méndez Prieto, A. (2023). Impacto del tamaño y geometría del pellet de plástico en la producción. Recuperado de *Plastics Technology México*: [https://www.pt-mexico.com/articulos/la-geometria-y-el-tamano-del-pellet-importan-durante-el-procesamiento-del-pet\(2\)](https://www.pt-mexico.com/articulos/la-geometria-y-el-tamano-del-pellet-importan-durante-el-procesamiento-del-pet(2))

Mendoza Camey, V.G.R. (2015). *Método Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) como una alternativa de rehabilitación de carreteras en Guatemala, proceso de construcción y normas de regularización*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.

Menéndez Pérez, P. J. (2015). *Determinación de los efectos de la incorporación de cal hidratada como Filler activo en una mezcla asfáltica en caliente bajo la metodología Marshall*. Universidad del Valle de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Ingeniería Civil.

Mexpolimeros. (2014). Polímeros de policondensación. Recuperado de: <https://www.mexpolimeros.com/POLY/polimeros-de-policondensacion.html>

Moghaddam, T. B., Karim, M. R., & Soltani, M. (2013). Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. *Journal of Engineering Science and Technology*, 8(3), 264-271.

Morhain, C. (2011). *Microestructura y propiedades mecánicas de compuestos de polipropileno con hidróxido de magnesio y aluminio moldeados por inyección*. Universitat Politècnica de Catalunya.

NETZSCH. (2023). Cristalinidad / Grado de Cristalinidad. Recuperado de: <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/training-know-how/glosario/cristalinidad-grado-de-cristalinidad#:~:text=La%20Cristalinidad%20se%20refiere%20al,de%20zonas%20cristalinas%20y%20amorf>

Noguera, B. (2020). ¿Qué es la polimerización?. Recuperado de IQR Ingeniería Química: <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/11/que-es-la-polimerizacion.html#Polimerizacion-por-condensacion>

Orozco Tinoco, M. A. (2019). *Efecto de Promotores de Adherencia en las Propiedades Mecánicas de Mezclas Asfálticas en Caliente*. Universidad del Norte. Barranquilla, Colombia.

Plaut, J. R. (2020). Significado de plastómero. Recuperado de Significado de: <https://www.significadode.org/plast%C3%B3mero.htm>

Ramírez, F. (2012). *Pavimento flexible y rígido*. Bogotá. Recuperado de: <https://www.slideshare.net/nievesiita/pavimento-flexible-y-rigido>

Romero Flores, P., Bonifaz García, H., & Revelo Corella, M. (2010). *Diseño de mezclas asfálticas en caliente modificadas con elastómeros (caucho) y tereftalato de polietileno reciclado con ligante AC-20*.

Salazar Carrasco, M. G. (2022). *Estudio del efecto del grado de entrecruzamiento químico sobre las propiedades fisicoquímicas de membranas de celulosa naturalmente funcionalizadas con proteínas provenientes de *Pyura chilensis**.

Salazar Delgado, J. (2011). Delgado, J. S. (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01. 22: 047). *Métodos y materiales, 1*, 25-38.

Salazar Zela, W. G. (2020). *Evaluación de mezcla asfáltica con aplicación de plástico reciclado para los pavimentos flexibles en San Juan de Miraflores, Lima 2019*.

Secretaría de Integración Económica Centroamericana. (2011). *Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de Carreteras*. Recuperado de: <https://intercoconnecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/Manual%20Centroamerica%20de%20normas%20para%20el%20dise%C3%B1o%20geometrico%20de%20carreteras%202011.pdf>

Shanbara, H. K., Musa, S. S., & Dulaimi, A. (2020). The Effect of polypropylene fibres on the tensile performance of asphalt mixtures for road pavements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 888, No. 1, p. 012082). IOP Publishing.

Sierra, E. T. (1991). NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)*, 1-11.

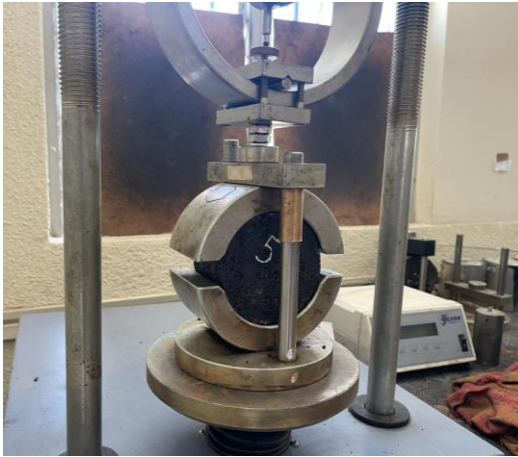
Tecnologías del concreto. (2021). Requisitos de calidad para los agregados. Recuperado de: <https://tecnologias-del-concreto.webnode.es/l/copia-de-un-articulo-sencillo-de-ejemplo/>

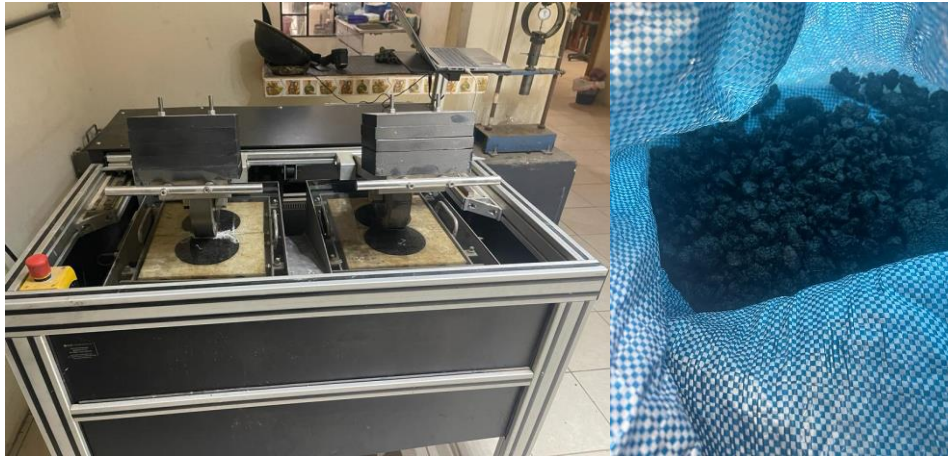
Vidal, S. (2023). Diferencia entre homopolímero y copolímero. Recuperado de Tecnobits: <https://tecnobits.com/diferencia-entre-homopolimero-y-copolimero/>

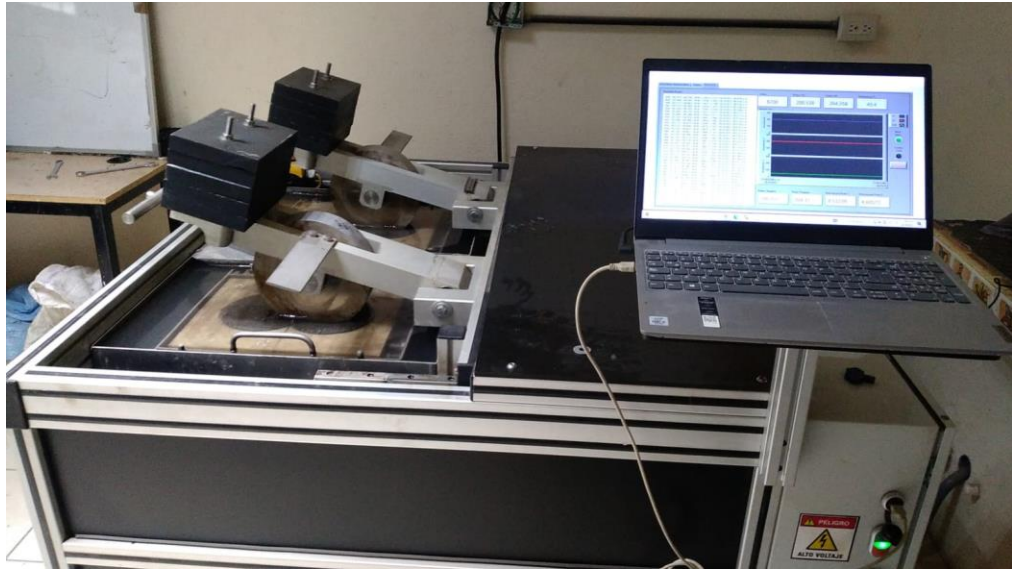
## X. APÉNDICES

### A. Fotografías de la fase experimental del proyecto y equipo









## **B. Hojas técnicas de cemento asfáltico AC-30**





ORIGEN: TERMINAL UNO BITUMEN

FECHA DE ENTREGA: 5-Septiembre-2023

LOTE: AC 30 LOTE 2023-19

CERTIFICADO No.: 2023-355

PRODUCTO: BITUMEN AC 30

ENSAYOS: 24-Agosto-2023

REPORTE DE ANÁLISIS

Nº	ANÁLISIS	MÉTODO ASTM	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES
1	VISCOSIDAD, 140°F (60°C); P	D 4402	2,753	3,000 ± 600
2	VISCOSIDAD, 275°F, (135°C); cSt	D 4402	444	350 min.
3	PUNTO DE DESTELLO, COC; °C	D 92	336	230 min.
4	SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO; %	D 2042	100	99 min.
5	GRAVEDAD ESPECÍFICA; A 15.6°C	D 70	1.032	REPORTAR
6	PENETRACIÓN 25°C, 100g, 5S; mm/10	D 5	62.0	50 min.
ENSAYOS AL RESIDUO DE RTFOT		D 2872		
7	CAMBIO DE MASA; % P/P	D 2872	-0.510	1 max.
8	VISCOSIDAD, 140°F (60°C), P	D 4402	6,750	12,000 max.
9	DUCTILIDAD A 25°C, 5cm/min; cm	D 113	150+	40 min.
10	TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN, °C	D 4402	142°C–148°C	REPORTAR
11	TEMPERATURA DE MEZCLA, °C	D 4402	154°C–159°C	REPORTAR

ANALIZADO POR: GRETTEL COLLART  
TÉCNICO LABORATORIO

REVISADO POR: GERARDO JUÁREZ  
SUPERVISOR DE LABORATORIO

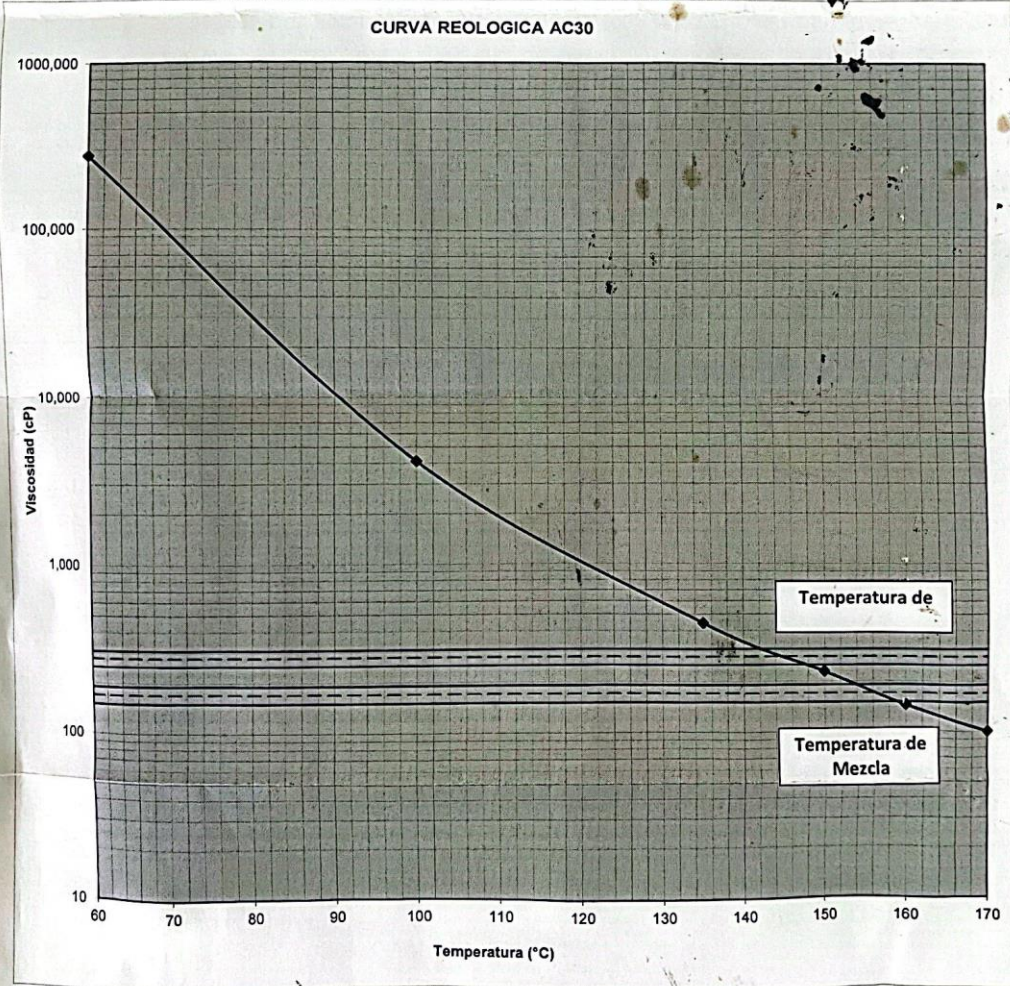
**UNO**  
Laboratorio

FO-BTCC-01 REV1



LOTE: AC 30 LOTE 2023-19  
FECHA DE ENTREGA: 5-Septiembre-2023

TEMP. DE COMPACTACIÓN: 142°C--148°C  
TEMP. DE MEZCLA: 154°C--159°C



FO-BTCC-01 REV1

## **C. Hoja técnica de resina PET**



# BOTTLE GRADE POLYESTER CHIPS CZ-302



## Product introduction

"JAIDE" Brand Copolyester "CZ-302" bottle grade polyester chips are suitable for making the packing bottles for pure water, natural mineral water, distilled water, drinking water, flavoring and candy containers, makeup's bottle and PET sheet material etc.

The brand of product features low heavy metal content, low content of acetaldehyde, good color value, stable viscosity. With a unique process recipe and advanced production technology, the product possesses excellent processing features, low processing temperature, wide scope in processing, excellent transparency and high in finished product rate. In making bottles, the product has a small degradation and low content of acetaldehyde. While ensuring safety and hygiene, it can effectively keep the respectively unique taste of purified water, mineral water and distilled water.

## Technical index

Item		Unit	Index	Test method
Intrinsic Viscosity (Foreign Trade)		dL/g	0.800 ± 0.02	GB17931
Content of acetaldehyde		ppm	≤ 1	Gas chromatography
Color value	L	-	≥ 82	HunterLab
	b	-	≤ 1	HunterLab
Carboxyl end group		mmol/kg	≤ 30	Photometric titration
Melting point		°C	243 ± 2	DSC
Water content		wt%	≤ 0.2	Weight method
Powder dust		ppm	≤ 100	Weight method
Wt. of 100 chips		g	1.55 ± 0.10	Weight method

## Typical processing conditions

Drying is necessary prior to the melt processing to prevent the resin from hydrolysis. Typical drying conditions are an air temperature of 160-180°C, 4-6 hours residence time, dew-point temperature below -40°C.

Typical barrel temperature about 275-293°C.

## **D. Informes de laboratorio de pruebas Marshall**

## RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN DISEÑO

<b>Proyecto:</b>	CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO
<b>Tipo Proyecto</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente
<b>Diseño Tipo:</b>	CONCRETO ASFALTICO TIPO "D" 19 mm (3/4")
<b>Dirigido:</b>	CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO
<b>Banco de Material</b>	BANCO CHIXOY
<b>Fecha:</b>	04/10/2023

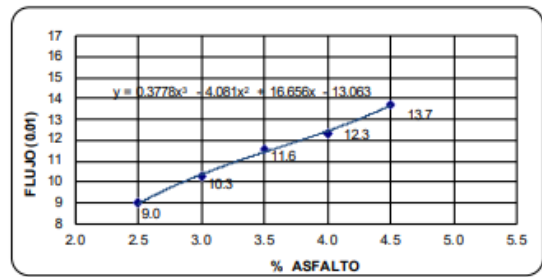
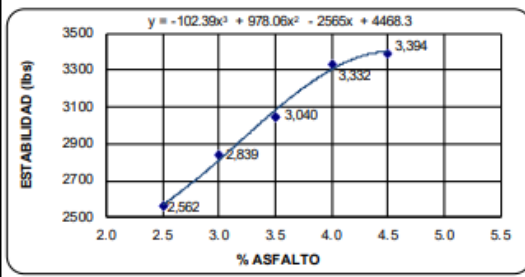
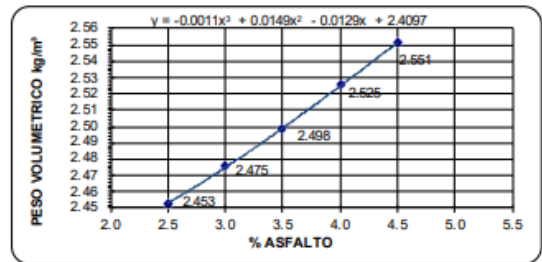
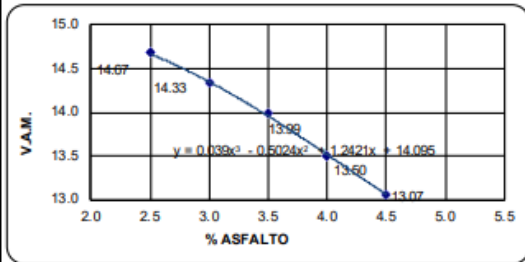
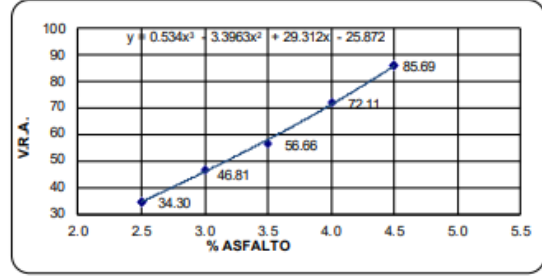
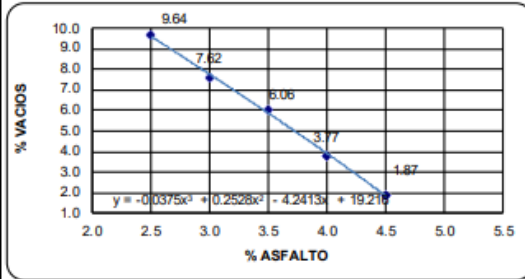
No.	Combinación de Agregados	%
1	3/4" BANCO CHIXOY	35
2	3/8" BANCO CHIXOY	22
3	ARENA TRITURADA 1/4" A 0,	43
		100

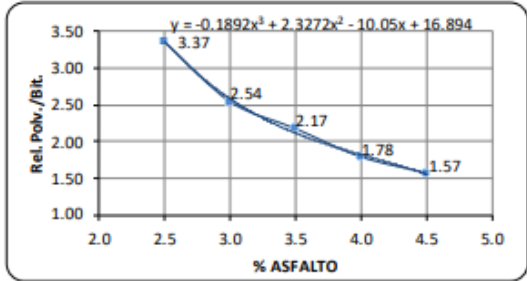
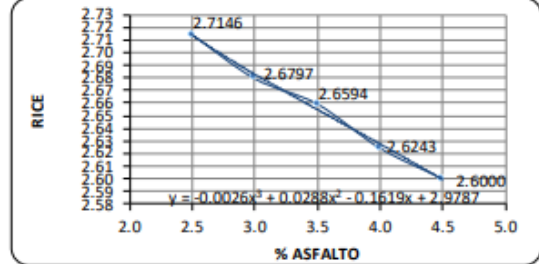
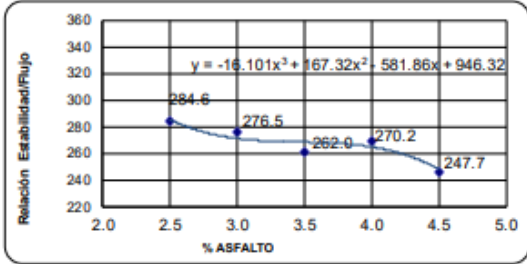
<b>Proporción:</b>	3/4=35%, 3/8"=22%, Polvo de Roca=43%
<b>Cemento Asfáltico</b>	CEMENTO ASFÁLTICO AC-30 UNOPETROL

Ensayo de Laboratorio	Resultado	Especificación
Número de Golpes por Cara de Pastillas	75	75
% Optimo de Asfalto	4.00	3 a 8
% Asfalto Absorbido	0.32	***
% Asfalto Efectivo	3.68	***
% Vacíos de Aire	3.90	3 a 5
% Vacíos Rellenos de Asfalto	71.21	65 a 75
% Vacíos de Agregado Mineral	13.52	> 13
Estabilidad Marshall	3304	>1200
Fluencia Marshall	12.4	8 a 16
Relación Polvo / Asfalto	1.82	0.6 a 1.6
Relación Estabilidad / Fluencia	266	120 a 275
Sensibilidad a la Humedad (resis. retenida, estab.remanente)	-	> 80 %
Gravedad Especifica Bruta de la Mezcla	2.809	***
Grav Especifica Rice de la mezcla AASHTO T 209 (Gmm)	2.624	***
Gravedad Especifica Bruta del Agregado (Bulk)	2.803	***
Gravedad Especifica Efectiva	2.804	***
Gravedad Especifica Aparente	2.851	***
Gravedad Especifica del Asfalto	1.033	***
% Absorción de Agua	0.60	***
% de vestimiento del Agregado	100	> 95
% Equivalente de Arena	67.6	> 35
Índice Plástico	0.00	< 4
Peso Unitario Seco Suelto	1841.1	> 1360 Kgs./Mts.3
% Caras Fracturadas (1 cara)	0.00	> 90
% Caras Fracturadas (2 caras)	98.20	> 75
% Partículas Planas y Alargadas	1.80	< 8

## GRÁFICO DE RESULTADOS – ANÁLISIS MARSHALL

ANÁLISIS GRÁFICO - METODO MARSHALL	
PROYECTO	CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO
FECHA	04/10/2023
CANTERA	BANCO CHIXOY
TIPO DE MATERIAL Y USO	CONCRETO ASFALTICO TIPO "D"
PROPORCIÓN	3/4=35%, 3/8=22%, Polvo de Roca=43%





**OBTENIDO - ESPECIFICADO**

PESO VOLUMETRICO	<u>2.526</u>	% V.A.M.	<u>13.52</u> x13
% VACIOS	<u>3.90</u> (3-5)	R.L. ESTAB./FLUID	<u>265.5</u> (120-275)
% VRA	<u>71.2</u> (65-75)	R.L. POLV./BIT	<u>1.82</u> (0.6-1.6)
ESTABILIDAD (LB)	<u>3304</u> (> 3000 LBS.)	RICE	<u>2.624</u>
FLUIDO (0.01")	<u>12.4</u> (8-14)	% OPTIMO ASFALTO	<u>4.00</u>

**FORMULÓ**

Marlon Ruano  
**Serpin**

**REVISÓ**

MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
**Serpin**



PUNTOS DE DISEÑO MARSHALL – 2.5% DE AC

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")				
<b>Tipo:</b>	M.A.C. Modificada Tipo "D"				
<b>Banco De Agregados:</b>	CHIXOY				
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL	<b>% De Asfalto:</b>	2.5		

	Lectura Micrometro	Estabilidad en libras	Volumen de muestra	Factor de correc. por volumen	Estabilidad Corregida	Promedio Flujo
	223	2372	491.6	1.09	2586	8.2
	233	2478	498.6	1.04	2577	9.0
	228	2425	496.5	1.04	2522	9.8
<b>PROMEDIO</b>	<b>228</b>	<b>2425</b>	<b>495.6</b>	<b>1.06</b>	<b>2562</b>	<b>9.00</b>


  

No.	%	Peso Neto Muestra	Peso Neto Muestra Sat.	Peso Neto en Agua	Volumen sin Corregir	Factor de Correc. por temperatura	Volumen Corregir	Densidad Corregida
1	2.5	1211.8	1224.4	732.8	491.6	1.00000	491.6	2.465
2	2.5	1220.0	1236.9	738.3	498.6	1.00000	498.6	2.447
3	2.5	1214.8	1233.9	737.4	496.5	1.00000	496.5	2.447
<b>PROMEDIO</b>	<b>2.5</b>	<b>1215.5</b>	<b>1231.7</b>	<b>736.2</b>	<b>495.6</b>	<b>1.00000</b>	<b>495.6</b>	<b>2.453</b>


Temperatura del Agua 25 °C Grados

Gmm - Densidad Rice	2.715		
Gmb - Grav. Esp. Bruta Mezcla	2.453	Pb - Peso Asfalto	0.061
Gsb - Grav. Esp. Bruta Agregado	2.803	Ps - Peso Agregado	2.392
Gse - Grav. Esp. Efectiva Agregado	2.833		
Gb - Grav. Esp. Del Asfalto	1.033		
Cb - Contenido de Asfalto	2.5		
<b>Vb Total</b>	<b>0.059</b>	<b>V.M.A. - Vacíos Agregado Mineral</b>	<b>14.67</b>
Vsb	0.853	Va - Vacíos de Aire 3 - 5 %	9.64
Vse	0.844	Pbe - Contenido Asfalto Efectivo	2.11
Vba	0.009	Pba - Contenido Asfalto Absorbido	0.39
Vbe	0.050	Vra - Vacíos llenos de Asfalto 65 -75%	34.30
Va	0.096	Gmm - Grav. Esp. Máxima Teórica de la mezcla AASHTO T 209	2.715
VMA	0.147	Relación Polvo Bitumen 0.60- 1.60	3.37
Pbe	0.052	Relación Estabilidad Flow 120 - 275	285
Pba	0.009		
Cbe	2.120		
Cba	0.390		
VFA	34.3		


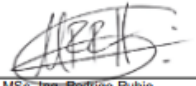


MARLON RUANO  
Serpin



MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Serpin

PUNTOS DE DISEÑO MARSHALL – 3.0% DE AC

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")							
<b>Tipo:</b>	M.A.C. Modificada Tipo "D"							
<b>Banco De Agregados:</b>	CHIXOY							
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL	<b>% De Asfalto:</b>	3.0					
PROMEDIO		<b>Lectura Micrometro</b>	<b>Estabilidad en libras</b>	<b>Volumen de muestra</b>	<b>Factor de correc. por volumen</b>	<b>Estabilidad Corregida</b>	<b>Promedio Flujo</b>	
		228	2425	488.6	1.09	2643	10.0	
		258	2743	473.7	1.14	3127	10.2	
		237	2520	489.5	1.09	2747	10.6	
		<b>241</b>	<b>2563</b>	<b>483.9</b>	<b>1.11</b>	<b>2839</b>	<b>10.27</b>	
<b>No.</b>	<b>%</b>	<b>Peso Neto Muestra</b>	<b>Peso Neto Muestra Sat.</b>	<b>Peso Neto en Agua</b>	<b>Volumen sin Corregir</b>	<b>Factor de Correc. por temperatura</b>	<b>Volumen Corregir</b>	<b>Densidad Corregida</b>
4	3.0	1212.7	1222	733.4	488.6	1.0000	488.6	2.482
5	3.0	1174.9	1180.7	707.0	473.7	1.0000	473.7	2.480
6	3.0	1206.1	1218.1	728.6	489.5	1.0000	489.5	2.464
<b>PROMEDIO</b>	<b>3.0</b>	<b>1197.9</b>	<b>1206.9</b>	<b>723.0</b>	<b>483.9</b>	<b>1.00000</b>	<b>483.9</b>	<b>2.475</b>
Temperatura del Agua 25 Grados								
<b>Gmm -</b>	Densidad Rice	<u>2.680</u>						
<b>Gmb -</b>	Grav. Esp. Bruta Mezcla	<u>2.475</u>		<b>Pb - Peso Asfalto</b>	<u>0.074</u>			
<b>Gsb -</b>	Grav. Esp. Bruta Agregado	<u>2.803</u>		<b>Ps - Peso Agregado</b>	<u>2.401</u>			
<b>Gse -</b>	Grav. Esp. Efectiva Agregado	<u>2.819</u>						
<b>Gb -</b>	Grav. Esp. Del Asfalto	<u>1.033</u>						
<b>Cb -</b>	Contenido de Asfalto	<u>3.0</u>						
<b>Vb Total</b>	<u>0.072</u>	<b>V.M.A. - Vacios Agregado Mineral</b>	<u>14.33</u>					
<b>Vsb</b>	<u>0.857</u>	<b>Va - Vacios de Aire 3 - 5 %</b>	<u>7.62</u>					
<b>Vse</b>	<u>0.852</u>	<b>Pbe - Contenido Asfalto Efectivo</b>	<u>2.79</u>					
<b>Vba</b>	<u>0.005</u>	<b>Pba - Contenido Asfalto Absorbido</b>	<u>0.21</u>					
<b>Vbe</b>	<u>0.067</u>	<b>Vra - Vacios llenos de Asfalto 65 -75%</b>	<u>46.81</u>					
<b>Va</b>	<u>0.076</u>	<b>Gmm - Grav. Esp. Máxima Teórica de la mezcla AASHTO T 209</b>	<u>2.680</u>					
<b>VMA</b>	<u>0.143</u>	<b>Relación Polvo Bitumen 0.60- 1.60</b>	<u>2.54</u>					
<b>Pbe</b>	<u>0.069</u>	<b>Relación Estabilidad Flow 120 - 275</b>	<u>277</u>					
<b>Pba</b>	<u>0.005</u>							
<b>Cbe</b>	<u>2.800</u>							
<b>Cba</b>	<u>0.207</u>							
<b>VFA</b>	<u>46.8</u>							
								
		MARLON RUANO Serpín		MSc. Ing. Rodrigo Rubio Serpín				

PUNTOS DE DISEÑO MARSHALL – 3.5% DE AC

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. Modificada Tipo "D"		
<b>Banco De Agregados:</b>	CHIXOY		
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL	<b>% De Asfalto:</b>	3.5

Lectura Micrometro	Estabilidad en libras	Volumen de muestra	Factor de correc. por volumen	Estabilidad Corregida	Promedio Flujo
261	2775	492.7	1.09	3024	11.6
268	2849	494.8	1.09	3105	12.0
258	2743	482.2	1.09	2990	11.2
<b>PROMEDIO</b>	<b>262</b>	<b>489.9</b>	<b>1.09</b>	<b>3040</b>	<b>11.60</b>

No.	%	Peso Neto Muestra	Peso Neto Muestra Sat.	Peso Neto en Agua	Volumen sin Corregir	Factor de Correc. por temperatura	Volumen Corregir	Densidad Corregida
7	3.5	1227.6	1232.8	740.1	492.7	1.00000	492.7	2.492
8	3.5	1236.1	1240.8	746.0	494.8	1.00000	494.8	2.498
9	3.5	1207.8	1214.5	732.3	482.2	1.00000	482.2	2.505
<b>PROMEDIO</b>	<b>3.5</b>	<b>1223.8</b>	<b>1229.4</b>	<b>739.5</b>	<b>489.9</b>	<b>1.00000</b>	<b>489.9</b>	<b>2.4982</b>


Temperatura del Agua 25 Grados

<b>Gmm</b> - Densidad Rice	2.659		
<b>Gmb</b> - Grav. Esp. Bruta Mezcla	2.498	<b>Pb</b> - Peso Asfalto	0.087
<b>Gsb</b> - Grav. Esp. Bruta Agregado	2.803	<b>Ps</b> - Peso Agregado	2.411
<b>Gse</b> - Grav. Esp. Efectiva Agregado	2.820		
<b>Gb</b> - Grav. Esp. Del Asfalto	1.033		
<b>Cb</b> - Contenido de Asfalto	3.5		


  

<b>Vb Total</b>	0.085	<b>V.M.A. - Vacios Agregado Mineral</b>	13.99
<b>Vsb</b>	0.860	<b>Va - Vacios de Aire 3 - 5 %</b>	6.06
<b>Vse</b>	0.855	<b>Pbe - Contenido Asfalto Efectivo</b>	3.27
<b>Vba</b>	0.005	<b>Pba - Contenido Asfalto Absorbido</b>	0.23
<b>Vbe</b>	0.079	<b>Vra - Vacios llenos de Asfalto 65 -75%</b>	56.66
<b>Va</b>	0.061	<b>Gmm - Grav. Esp. Máxima Teórica de la mezcla AASHTO T 209</b>	2.659
<b>VMA</b>	0.140	<b>Relación Polvo Bitumen 0.60- 1.60</b>	2.17
<b>Pbe</b>	0.082	<b>Relación Estabilidad Flow 120 - 275</b>	262
<b>Pba</b>	0.006		
<b>Cbe</b>	3.278		
<b>Cba</b>	0.230		
<b>VFA</b>	56.7		



MARLON RUANO  
Serpín



MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Serpin



PUNTOS DE DISEÑO MARSHALL – 4.5% DE AC

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. Modificada Tipo "D"		
<b>Banco De Agregados:</b>	CHIXOY		
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL	<b>% De Asfalto:</b>	4.5

Lectura Micrometro	Estabilidad en libras	Volumen de muestra	Factor de correc. por volumen	Estabilidad Corregida	Promedio Flujo
266	2828	484.8	1.09	3082	13.7
305	3240	473.0	1.14	3694	14.6
294	3124	482.1	1.09	3405	12.8
<b>PROMEDIO</b>	<b>3064</b>	<b>480.0</b>	<b>1.11</b>	<b>3394</b>	<b>13.70</b>

No.	%	Peso Neto Muestra	Peso Neto Muestra Sat.	Peso Neto en Agua	Volumen sin Corregir	Factor de Correc. por temperatura	Volumen Corregir	Densidad Corregida
13	4.5	1233.1	1234.0	749.2	484.8	1.0000	484.8	2.544
14	4.5	1212.4	1213.9	740.9	473.0	1.0000	473.0	2.563
15	4.5	1228.1	1229.2	747.1	482.1	1.0000	482.1	2.547
<b>PROMEDIO</b>	<b>4.5</b>	<b>1224.5</b>	<b>1225.7</b>	<b>745.7</b>	<b>480.0</b>	<b>1.00000</b>	<b>480.0</b>	<b>2.5514</b>


Temperatura del Agua 25 Grados

<b>Gmm -</b> Densidad Rice	<u>2.600</u>	<b>Pb - Peso Asfalto</b>	<u>0.115</u>
<b>Gmb -</b> Grav. Esp. Bruta Mezcla	<u>2.551</u>	<b>Ps - Peso Agregado</b>	<u>2.437</u>
<b>Gsb -</b> Grav. Esp. Bruta Agregado	<u>2.803</u>		
<b>Gse -</b> Grav. Esp. Efectiva Agregado	<u>2.800</u>		
<b>Gb -</b> Grav. Esp. Del Asfalto	<u>1.033</u>		
<b>Cb -</b> Contenido de Asfalto	<u>4.5</u>		


  

<b>Vb Total</b>	<u>0.111</u>	<b>V.M.A. - Vacíos Agregado Mineral</b>	<u>13.07</u>
<b>Vsb</b>	<u>0.869</u>	<b>Va - Vacíos de Aire 3 - 5 %</b>	<u>1.87</u>
<b>Vse</b>	<u>0.870</u>	<b>Pbe - Contenido Asfalto Efectivo</b>	<u>4.54</u>
<b>Vba</b>	<u>-0.001</u>	<b>Pba - Contenido Asfalto Absorbido</b>	<u>-0.04</u>
<b>Vbe</b>	<u>0.112</u>	<b>Vra - Vacíos llenos de Asfalto 65 -75%</b>	<u>85.69</u>
<b>Va</b>	<u>0.019</u>	<b>Gmm - Grav. Esp. Máxima Teórica de la mezcla AASHTO T 209</b>	<u>2.600</u>
<b>VMA</b>	<u>0.131</u>	<b>Relación Polvo Bitumen 0.60- 1.60</b>	<u>1.57</u>
<b>Pbe</b>	<u>0.116</u>	<b>Relación Estabilidad Flow 120 - 275</b>	<u>248</u>
<b>Pba</b>	<u>-0.001</u>		
<b>Cbe</b>	<u>4.534</u>		
<b>Cba</b>	<u>-0.035</u>		
<b>VFA</b>	<u>85.7</u>		





MARLON RUANO  
Serpin



MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Serpin

**GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA – MÉTODO RICE  
– PUNTOS DE DISEÑO**

**AASHTO T-209 ASTM D-2041**

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")				
<b>Banco De Agregados:</b>	Chixoy				
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL				
<b>Temperatura del agua:</b>	25°C				
<b>Puntos de Diseño - % de Cemento Asfáltico en Mezcla (%)</b>	<b>2.50%</b>	<b>3.00%</b>	<b>3.50%</b>	<b>4.00%</b>	<b>4.50%</b>
A = Peso en el Aire de la Muestra Seca (g)	1322	1305	1343	1425	1404
D = Peso del Recipiente Lleno con Agua (g)	10040	10040	10040	10040	10040
E = Peso del Recipiente Lleno con Agua y Muestra (g)	10875	10858	10878	10922	10904
<b>Gravedad Específica Teórica Máxima de la Mezcla - G<sub>mm</sub></b>	<b>2.715</b>	<b>2.680</b>	<b>2.659</b>	<b>2.624</b>	<b>2.600</b>
<b>Observaciones:</b> $G_{mm} = A/(A+D-E)$					
Temperatura del agua durante el ensayo = 25°C					
Factor de corrección = 1.00					
 <hr style="width: 150px; margin: 0 auto;"/> Marlon Ruano Elaboró					
 <hr style="width: 150px; margin: 0 auto;"/> MSc. Ing. Rodrigo Rubio Serpin					

## GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK (Gsb) Y ABSORCIÓN DE LOS AGREGADOS (INTEGRADA)

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")
<b>Banco De Agregados:</b>	Chixoy
<b>Cemento Asfáltico:</b>	AC-30 UNOPETROL
<b>Temperatura del agua:</b>	25°C

Agregado	Grueso	Intermedio	Fino	Integrado
	3/4" Piedrín Triturado	3/8" Piedrín Triturado	Arena triturada	
<b>Porcentaje de Participación</b>	35%	22%	43%	<b>100%</b>
<b>Gsb - (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.827	2.794	2.788	<b>2.803</b>
<b>Absorción</b>	0.309	1.266	0.523	<b>0.60</b>

### Ecuaciones:

Gravedad Específica Bruta de Mezcla de Agregados:

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}$$

Porcentaje de Absorción de Mezcla de Agregados:

$$A = \frac{(P_1)(A_1) + (P_2)(A_2) + \dots + (P_n)(A_n)}{100}$$

Ecuaciones según Manual de Diseño de Mezclas Asfálticas MS-2 del Instituto de asfalto (7a edición).

## INTEGRACIÓN DE AGREGADOS PARA GRADUACIÓN TIPO "D"



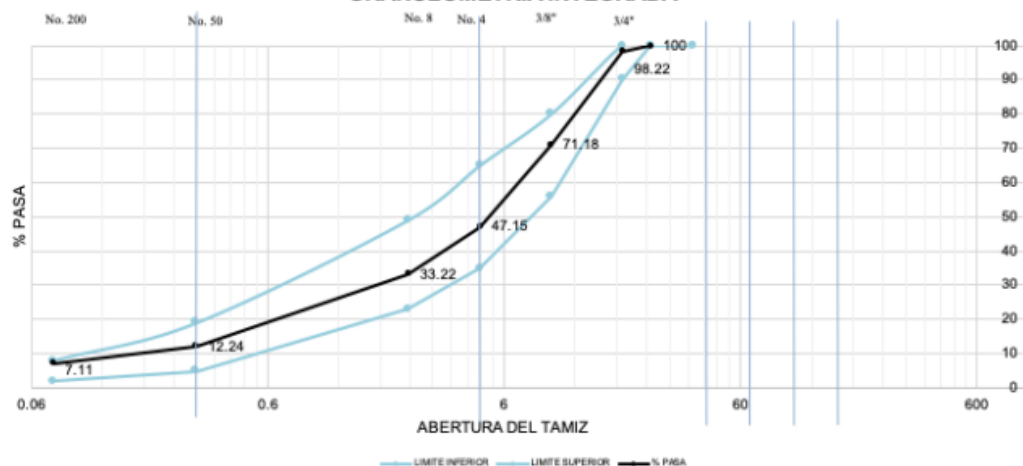
Centro Corporativo Muxbal, Torre Este, Of. 506.

### INTEGRACIÓN GRANULOMETRICA DE AGREGADOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. TIPO "D" (19 mm)	<b>Banco:</b>	CHIXOY

TAMIZ		MATERIAL	% PARTICIP.	MATERIAL	% PARTICIP.	MATERIAL	% PARTICIP.	INTEGRACIÓN	Especificación Base
ASTM	mm	3/4"	35	3/8"	22	ARENA T.	43	100	
1 1/2"	38.1	100.00	35.00	100.00	22.00	100.00	43.00	100.00	100
1"	25.4	100.00	35.00	100.00	22.00	100.00	43.00	100.00	100
3/4"	19	94.91	33.22	100.00	22.00	100.00	43.00	98.22	90 - 100
1/2"	12.5	44.23	15.48	100.00	22.00	100.00	43.00	80.48	
3/8"	9.5	19.34	6.77	97.32	21.41	100.00	43.00	71.18	56 - 80
1/4"	6.35	13.42	4.70	42.28	9.30	99.95	42.98	56.98	
No. 4	4.75	5.57	1.95	10.30	2.27	99.84	42.93	47.15	35 - 65
No. 8	2.36	5.14	1.80	3.72	0.82	71.16	30.60	33.22	23 - 49
No. 16	1.18	3.08	1.08	3.50	0.77	45.88	19.73	21.58	
No. 30	0.6	3.19	1.12	3.40	0.75	30.09	12.94	14.80	
No. 40	0.425	2.93	1.03	3.34	0.73	25.01	10.75	12.51	
No. 50	0.3	2.67	0.93	3.23	0.71	24.63	10.59	12.24	5 - 19
No. 100	0.15	2.40	0.84	3.12	0.69	16.49	7.09	8.62	
No. 200	0.075	2.14	0.75	2.74	0.60	13.38	5.75	7.11	2 - 8

**GRANULOMETRÍA INTEGRADA**



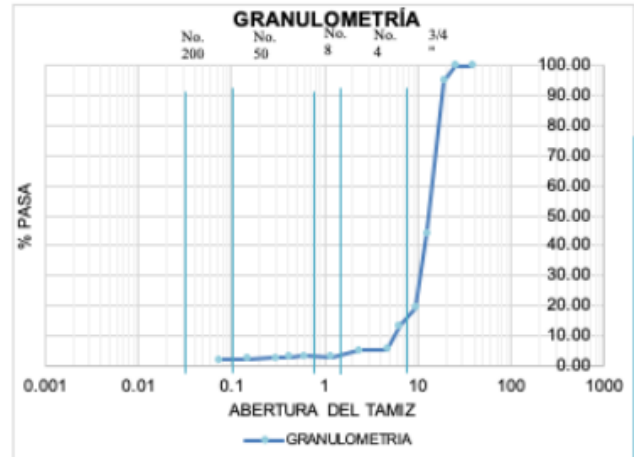


**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y GRAVEDADES ESPECÍFICAS – AGREGADO GRUESO – TMN ¾”**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – AASHTO T-27**

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. TIPO "D" (19 mm)	<b>Banco:</b>	CHIXOY
<b>Material:</b>	Agregado Grueso TMN ¾"		

Tamiz	Tamiz (mm)	% Pasa
1 1/2"	38.1	100.00
1"	25.4	100.00
3/4"	19	94.91
1/2"	12.5	44.23
3/8"	9.5	19.34
1/4"	6.35	13.42
No. 4	4.75	5.57
No. 8	2.36	5.14
No. 16	1.18	3.08
No. 30	0.6	3.19
No. 40	0.425	2.93
No. 50	0.3	2.67
No. 100	0.15	2.40
No. 200	0.075	2.14



**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN - AASHTO T-85**

	Ensayo #1	Ensayo #2	Ensayo #3	T de Agua (°C)
A = Peso Seco en el Aire Promedio (g)	430	480.5	446.8	25°
B = Peso Saturada en el Aire Promedio (g)	431.3	482	448.2	F. de Corrección
C = Peso Sumergido Saturado Promedio (g)	279.3	311.8	290.2	1.00

Ensayo	1	2	3	Promedio
Gravedad Específica Bruta $G_{sb}$	2.8289	2.8231	2.8278	2.8266
Gravedad Específica Bruta S.S.S. $G_{sbss}$	2.8375	2.8320	2.8367	2.8354
Gravedad Específica Aparente $G_{sa}$	2.8534	2.8483	2.8531	2.8516
Porcentaje de Absorción (%)	0.3023	0.3122	0.3133	0.3093

Marlon Ruano  
Elaboró

MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Revisó

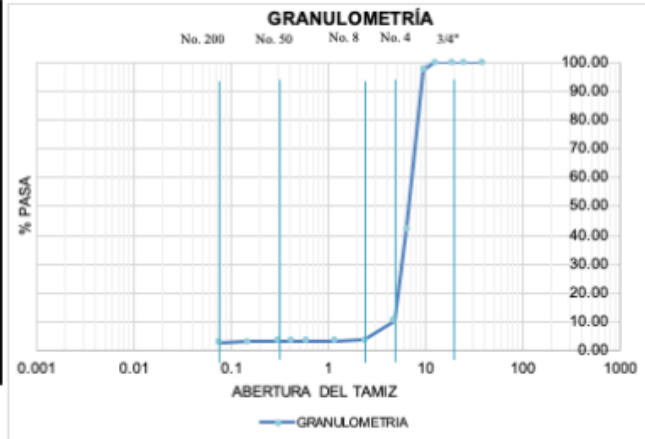
**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y GRAVEDADES ESPECÍFICAS – AGREGADO INTERMEDIO – 3/8"**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – AASHTO T-27**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – AASHTO T-27**

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. TIPO "D" (19 mm)	<b>Banco:</b>	CHIXOY
<b>Material:</b>	Agregado Grueso TMN 3/8"		

Tamiz	Tamiz (mm)	% Pasa
1 1/2"	38.1	100.00
1"	25.4	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.5	97.32
1/4"	6.35	42.28
No. 4	4.75	10.30
No. 8	2.36	3.72
No. 16	1.18	3.50
No. 30	0.6	3.40
No. 40	0.425	3.34
No. 50	0.3	3.23
No. 100	0.15	3.12
No. 200	0.075	2.74



**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN - AASHTO T-85**

	Ensayo #1		Ensayo #2		Ensayo #3	
	Ret. No. 4	Pasa No. 4	Ret. No. 4	Pasa No. 4	Ret. No. 4	Pasa No. 4
A = Peso Seco en el Aire Promedio (g)	299.6	95.5	335.2	91.3	324.0	97.6
B = Peso Saturada en el Aire Promedio (g)	302.8	96.5	340.0	92.3	328.4	98.7
C = Peso Sumergido Saturado Promedio (g)	196.1	61.8	220.0	59.1	212.5	63.2

Ensayo	Ensayo #1		Ensayo #2		Ensayo #3		Promedio Integrada
	Ret. No. 4	Pasa No. 4	Ret. No. 4	Pasa No. 4	Ret. No. 4	Pasa No. 4	
G. Especifica Bruta $G_{sb}$	2.8079	2.7522	2.7933	2.7500	2.7955	2.7493	2.7939
G. Especifica Aparente $G_{sa}$	2.8379	2.7810	2.8333	2.7801	2.8335	2.7803	2.8293
G. Especifica Bruta S.S.S. $G_{ss}$	2.8947	2.8338	2.9097	2.8354	2.9058	2.8372	2.8964
% de Absorción (%)	1.0681	1.0471	1.4320	1.0953	1.3580	1.1270	1.27

\*\*Promedio Integrada = Gravedad Especifica total del material. \*T Agua 25 °C F. Corrección 1.00

  
 Marlon Ruano  
 Elaboró

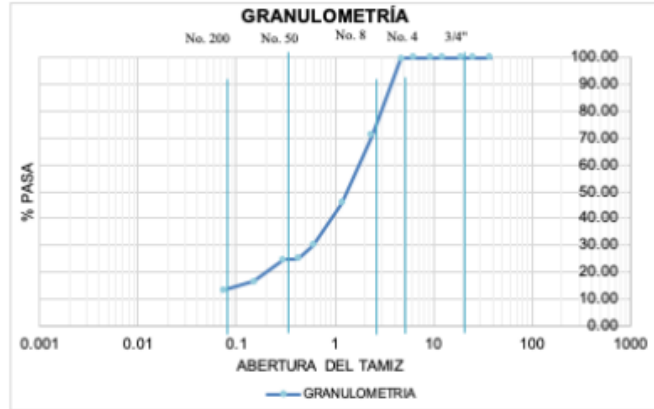
  
 MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
 Revisó

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO Y GRAVEDADES ESPECÍFICAS – AGREGADO FINO – ARENA TRITURADA ¼" A FINO**

**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO – AASHTO T-27**

<b>Proyecto:</b>	Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente Tipo "D" 19 mm (3/4")		
<b>Tipo:</b>	M.A.C. TIPO "D" (19 mm)	<b>Banco:</b>	CHIXOY
<b>Material:</b>	Arena Triturada		


Tamiz	Tamiz (mm)	% Pasa
1 1/2"	38.1	100.00
1"	25.4	100.00
3/4"	19	100.00
1/2"	12.5	100.00
3/8"	9.5	100.00
1/4"	6.35	99.95
No. 4	4.75	99.84
No. 8	2.36	71.16
No. 16	1.18	45.88
No. 30	0.6	30.09
No. 40	0.425	25.01
No. 50	0.3	24.63
No. 100	0.15	16.49
No. 200	0.075	13.38



**GRAVEDAD ESPECÍFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN - AASHTO T-85**

	Ensayo #1	Ensayo #2	Ensayo #3	T de Agua (°C)
A = Peso Seco en el Aire Promedio (g)	497.2	497.4	497.6	25°
B = Peso Saturada en el Aire Promedio (g)	500	500	500.0	F. de Corrección
C = Peso Sumergido Saturado Promedio (g)	321.1	322.1	321.5	1.00

Ensayo	1	2	3	Promedio
Gravedad Específica Bruta $G_{sb}$	2.7792	2.7960	2.7877	2.7876
Gravedad Específica Bruta S.S.S. $G_{sbss}$	2.7949	2.8106	2.8011	2.8022
Gravedad Específica Aparente $G_{sa}$	2.8234	2.8374	2.8257	2.8288
Porcentaje de Absorción (%)	0.5632	0.5227	0.4823	0.5227

  
 Marlon Ruano  
 Elaboró

  
 MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
 Revisó

**EQUIVALENTE DE ARENA AASHTO T-176 – DISEÑO DE MEZCLA**

**EQUIVALENTE DE ARENA**  
**AASHTO T 176**

<b>PROYECTO:</b>	<u>CONSTRUCTORA SAN FRANCIS</u>	<b>FECHA:</b>	<u>4/10/23</u>
<b>TIPO DE MATERIAL:</b>	<u>CONCRETO ASFALTICO TIPO "D"</u>		
<b>PROPORCIÓN</b>	<u>3/4=35%, 3/8"=22%, Polvo de Roca=43%</u>		
<b>CANTERA:</b>	<u>CHIXOY</u>		

LECTURA	ENSAYO		
	1	2	3
HORA DE INICIO DE INMERSIÓN	09:35	09:38	09:41
HORA DE SALIDA DE INMERSIÓN	09:45	09:48	09:51
HORA DE INICIO POST-AGITACIÓN	09:48	09:51	09:54
HORA DE SALIDA POST-AGITACIÓN	10:08	10:11	10:16
NIVEL SUPERIOR DE SUSPENSIÓN DE FINOS	5.00	5.00	5.1
NIVEL SUPERIOR DE ARENA	3.4	3.4	3.4
EQUIVALENTE DE ARENA	68.00	68.00	66.67
<b>EQUIVALENTE DE ARENA PROMEDIO</b>	<b>67.56</b>		

OBSERVACIONES:

PROPORCION: 3/4=35%, 3/8"=22%, Polvo de Roca=43%

---



---




---

Elaboró:



Marlon Ruano  
Serpín

Aprobó:



MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Serpín


ENSAYO DE PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS – ASTM D 4791


**CONTROL DE PARTÍCULAS ASTM D 4791**

**PROYECTO:** CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO **FECHA:** 4/10/23  
**PROYECTO TIPO:** Diseño De Mezcla Asfáltica En Caliente  
**DISEÑO TIPO:** CONCRETO ASFALTICO TIPO "D" 19 mm (3/4")


BANCO DE MATERIAL	MUESTRA No	TIPO DE MATERIAL	% de Partículas con 1 o mas Caras Fracturadas	% de Partículas con 2 o mas Caras Fracturadas	% de Partículas REDONDAS	% de Partículas Planas y Alargadas
BANCO CHIXOY	1	COMBINACION DE AGREGADOS - 27% DE 3/4" , 30% DE 3/8" , 43% DE ARENA TRITURADA	0.0	98.2	0.0	1.80

**OBSERVACIONES:** Agregados triturados para diseño de mezcla asfáltica tipo D; la combinación de agregados cumple con el requerimiento establecido en la sección 401.03 de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de

ELABORÓ:   
 Marlon Ruano  
 Serpin

REVISÓ:   
 MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
 Serpin

## LÍMITES DE CONSISTENCIA (ATTERBERG) AASHTO T-89 Y AASHTO T-90



Centro Corporativo Muxbal , Torre Este Of. 506.

**LÍMITES DE CONSISTENCIA**  
**AASHTO T-89 Y AASHTO T-90**

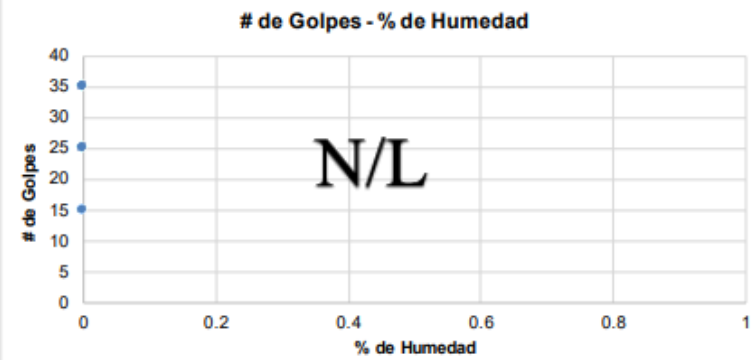
<b>Proyecto</b>	CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO		<b>Muestra de:</b>	ARENA TRITURADA
<b>Estación</b>	---		<b># de Muestra:</b>	2
<b>Procedencia:</b>	BANCO CHIXOY		<b>Fecha:</b>	4/10/23
<b>Dirigido a:</b>				

LÍMITE LÍQUIDO			
# Golpes	15 - 25	20 - 30	25 - 35
$P_{bh}$		N/L	
$P_{bs}$			
Tara			
Diferencia			
$P_{ms}$			
Humedad			
Promedio			

LÍMITE PLÁSTICO	
N/P	


% de Humedad	0.00%	0.00%	0.00%
# de Golpes	15	25	35

# de Golpes - % de Humedad




RESULTADOS	
LÍMITE LÍQUIDO	N/L
LÍMITE PLÁSTICO	N/P
INDICE DE PLASTICIDAD	N/P

\*N/L = No Líquido  
\*N/P = No Plástico



Maron Ruano  
Elaboró



MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Revisó

PESOS UNITARIOS VOLUMETRICOS DE AREGADOS – AASHTO T-19



PESO UNITARIO VOLUMÉTRICO  
AASHTO T 19

PROYECTO: CONSTRUCTORA SAN FRANCISCO  
 EMPRESA: COINDRA FECHA: 4/10/23  
 BANCO DE MATERIAL: BANCO CHIXOY MUESTRA: No.2  
 PROPORCIÓN: 3/4=35%, 3/8=22%, Polvo de Roca=43%  
 GRADUACION: TIPO D, 19MM, 3/4"

MUESTRA		AGREGADO GRUESO - TMN 3/4"					
		PESO UNITARIO SUELTO			PESO UNITARIO VARILLADO		
		Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 1	Nº 2	Nº 3
A	Peso del Material + Tara	9982.0	9996.0	9992.0	10236.0	10288.0	10245.0
B	Peso de la Tara	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0
C	Peso del Material	3336.0	3350.0	3346.0	3590.0	3642.0	3599.0
D	Volumen del Recimiento	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111
E	Peso Volumétrico (kg/m3)	1580.3	1586.9	1585.0	1700.6	1725.2	1704.9
Peso Unitario Promedio (kg/m3)		1584.1			1710.2		

MUESTRA		AGREGADO GRUESO - TMN 3/8"					
		PESO UNITARIO SUELTO			PESO UNITARIO VARILLADO		
		Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 1	Nº 2	Nº 3
A	Peso del Material + Tara	9727.0	9729.0	9712.0	10101.0	10105.0	10108.0
B	Peso de la Tara	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0
C	Peso del Material	3081.0	3083.0	3066.0	3455.0	3459.0	3462.0
D	Volumen del Recimiento	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111
E	Peso Volumétrico (kg/m3)	1459.5	1460.4	1452.4	1636.7	1638.6	1640.0
Peso Unitario Promedio (kg/m3)		1457.4			1638.4		

MUESTRA		ARENA TRITURADA					
		PESO UNITARIO SUELTO			PESO UNITARIO VARILLADO		
		Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 1	Nº 2	Nº 3
A	Peso del Material + Tara	10265.0	10253.0	10272.0	10629.0	10631.0	10618.0
B	Peso de la Tara	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0	6646.0
C	Peso del Material	3619.0	3607.0	3626.0	3983.0	3985.0	3972.0
D	Volumen del Recimiento	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111	2.111
E	Peso Volumétrico (kg/m3)	1714.4	1708.7	1717.7	1886.8	1887.7	1881.6
Peso Unitario Promedio (kg/m3)		1713.6			1885.4		

Elaboró:

Revisó:

Marlon Ruano  
Serpín

MSc. Ing. Rodrigo Rubio  
Serpín

## CÁLCULO DE GALONES POR TONELADA

- 1 Tonelada = 1,000 Kg
- Cálculo de m<sup>3</sup> Agregados Pétreos por Toneladas

Cálculo de Agregados Pétreos		
<b>Cálculo para Tonelada de</b>	<b>1000</b>	kg
Kg del total de agregados pétreos menos kg de AC	960	kg
Agregado Tam. Max 3/4" (TNM 3/4")		
<b>Peso Unitario</b>	<b>1584.1</b>	kg/m <sup>3</sup>
Participación en la mezcla	35	%
kg de agregado Tam Max 1" (TNM 1")	336	kg
m <sup>3</sup> por tonelada	0.2121	m <sup>3</sup>
Agregado 3/8"		
<b>Peso Unitario</b>	<b>1457.4</b>	kg/m <sup>3</sup>
Participación en la mezcla	22	%
kg de agregado 3/8"	211.2	kg
m <sup>3</sup> por tonelada	0.1449	m <sup>3</sup>
Agregado 1/4" a 0"		
<b>Peso Unitario</b>	<b>1385.1</b>	kg/m <sup>3</sup>
Participación en la mezcla	43	%
kg de agregado 3/8"	412.8	kg
m <sup>3</sup> por tonelada	0.2980	m <sup>3</sup>

- Cálculo de Galones de Cemento Asfáltico por Tonelada

Cálculo de galones de AC por Tonelada de Mezcla Asfáltica Convencional		
Porcentaje óptimo AC	4.0	%
Tipo de tonelada	métrica	
Kg por Ton	1000	kg
Kg de AC por Ton	40	kg de AC por Ton
Cálculo de Kg de AC por galón		
1 galón es igual a	0.00378541	m <sup>3</sup>
Peso (kg) = densidad del asfalto (kg/m <sup>3</sup> )xVolumen(m <sup>3</sup> )		
Densidad del Asfalto	1033	kg/m <sup>3</sup>
Peso	3.91032853	kg de AC / galón
Galones por Ton = kg de AC por galón / cuántos kg pesa un galón de AC		
Galones por Ton	10.2293	Galones por Tonelada