

Rodolfo Alvarado
Uribe

Mejora del desempeño de la superficie de rodamiento mediante una mezcla
de emulsión asfáltica con fibras de PET
Tesis

2023



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

**Mejora del desempeño de la superficie de rodamiento mediante una mezcla de
emulsión asfáltica con fibras de PET**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta:

Rodolfo Alvarado Uribe

Querétaro, Qro a
29 de noviembre de 2023

La presente obra está bajo la licencia:
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>



CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas](#) que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una [excepción o limitación](#) aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como [publicidad, privacidad, o derechos morales](#) pueden limitar la forma en que utilice el material.



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de ingeniería

Maestría en Ingeniería en Vías Terrestres y Movilidad

Mejora del desempeño de la superficie de rodamiento mediante una mezcla
de emulsión asfáltica con fibras de PET

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Vías
Terrestres y Movilidad

Presenta

Rodolfo Alvarado Uribe

Dirigido por:

Juan Bosco Hernández Zaragoza

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

Presidente

Firma

Dr. Jaime Moisés Horta Rangel

Secretario

Firma

Dr. Ricardo Montoya Zamora

Vocal

Firma

M.C. Gerardo Medellín Aguilar

Suplente

Firma

Dra. Elda Montes Zarazúa

Suplente

Firma

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Director de la Facultad

Dr. Juan Carlos Jauregui
Director de Investigación
Y Posgrado

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (12, 2022)

RESUMEN

Gran porcentaje de los accidentes viales son causados por una inadecuada resistencia al deslizamiento en la superficie del pavimento, por lo que es importante mantener una macrotextura con una prolongada vida útil, manteniendo las características que permiten un mejor frenado y un rápido desalojo del agua. En esta investigación se realizará la combinación de diferentes proporciones de polímeros con mezclas asfálticas, con la finalidad de desarrollar un material que mejore las propiedades de resistencia al pulimiento y desgaste de una superficie de rodamiento, para ello se caracterizaron los agregados pétreos y la emulsión asfáltica conforme a la normativa ISSA que es la que rige los slurry y capas de mejoramiento superficial de los pavimentos asfálticos, los agregados pétreos se caracterizaron realizándoles, granulometría, desgaste de los Ángeles, microdeval, equivalente de arena, e intemperismo acelerado, que son pruebas que se usan para medir el desgaste, para la emulsión asfáltica se le hizo contenido de asfalto, se usó agregado pétreo natural de banco, con características visuales semejantes al basalto y un tamaño nominal de 3/8" que es el tamaño que se usa regularmente para los riegos de sello. Se realizaron muestras con porcentajes de PET que van del 0% al 10%, variando 2.5% en cada una de ellas, es decir, 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10%. Se realizó círculo de arena en cada una de las pruebas para observar su macrotextura inicial, posteriormente se sometieron a una prueba que marca la normativa ISSA TB 100, la cual somete a abrasión la prueba mediante una batidora industrial modelo Hobart N50, a la cual se le colocó una manguera abrasiva en parte inferior del gancho, las pruebas se pusieron 315 segundos en abrasión sumergidas en agua. Como resultado se obtuvo que la muestra con menor pérdida de agregado al ensayarla en la máquina fue la prueba C que corresponde a 5% de PET pero también fue la que mayor pérdida de macrotextura tuvo, la prueba A que no tiene PET fue la que se desempeñó de mejor manera en cuestión de conservación de macrotextura.

Palabras clave: PET, Macrotextura, Deslizamiento, Emulsión asfáltica, Desgaste

Keywords: PET (polyethylene terephthalate), Macrotexture, Skid, Asphalt emulsión, Degradation

ABSTRACT

A large percentage of road accidents are caused by inadequate skid resistance on the pavement surface, making it important to maintain a macrotexture with an extended lifespan, preserving features that enable better braking and rapid water drainage. In this research, a combination of different polymer proportions with asphalt mixes will be carried out to develop a material that enhances the resistance to polishing and wear of a road surface. Aggregates and asphalt emulsion were characterized according to ISSA regulations, which govern slurry and surface improvement layers of asphalt pavements. The stone aggregates were characterized through tests such as gradation, Los Angeles abrasion, micro-Deval, sand equivalent, and accelerated weathering, commonly used to measure wear. The asphalt emulsion underwent asphalt content testing and used natural bank stone aggregate with visual characteristics similar to basalt and a nominal size of 3/8", which is regularly used for seal coatings.

Samples were created with PET (polyethylene terephthalate) percentages ranging from 0% to 10%, varying by 2.5% increments (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, and 10%). A sand circle was created in each test to observe its initial macrotexture. Subsequently, the samples underwent a test following ISSA TB 100 regulations, subjecting them to abrasion using an industrial mixer model Hobart N50. An abrasive hose was attached to the lower part of the hook, and the tests were subjected to 315 seconds of abrasion submerged in water.

As a result, it was found that the sample with the least aggregate loss during the machine test was Test C, corresponding to 5% PET. However, it also experienced the greatest loss of macrotexture. Test A, which did not contain PET, performed the best in terms of macrotexture preservation.

DEDICATORIAS

Principalmente a mi mamá María Aida Uribe Marrufo, por su sacrificio, amor y apoyo incondicional, por los consejos que me ha dado y los ánimos que me ha brindado para concluir esta investigación.

A mi papá Rodolfo Alvarado Jurado, que siempre me inculcó la disciplina, el interés en aprender cosas nuevas, y ha sido mi ejemplo para seguir. Lo que soy es gracias a ellos dos

A mi hermana que siempre ha estado conmigo en los buenos y malos momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del programa de PNPB y a la Universidad Autónoma de Querétaro por la beca recibida en este periodo de dos años.

Expreso mi profundo agradecimiento al Dr. Ricardo Montoya Zamora y al M.I. Roberto Israel Hernández Domínguez por su guía, apoyo y paciencia que tuvieron hacia mi durante el desarrollo de esta investigación. Al Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza por su tiempo y atención.

ÍNDICE

RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
DEDICATORIAS.....	4
AGRADECIMIENTOS	5
ÍNDICE	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS	10
INTRODUCCIÓN	10
1.1 ANTECEDENTES.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN	14
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
1.4 HIPÓTESIS.....	16
1.5 OBJETIVOS	16
1.5.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 ESTADO DEL ARTE	16
2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS.....	16
2.1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE.....	17
2.1.2. PAVIMENTO RÍGIDO	18
2.2. TEXTURAS DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.....	19
2.3 USO DE POLÍMEROS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	21
2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	25
2.5 INFLUENCIA DEL VEHICULO EN LA RUGOSIDAD	26
METODOLOGÍA	28
3.1. MUESTREO DE MATERIALES.....	30
3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES	30
3.1.2 MICRODEVAL.....	31
3.1.3 EQUIVALENTE DE ARENA.....	34
3.1.4 DESGASTE DE LOS ÁNGELES	42
3.1.5 ANALISIS GRANULOMÉTRICO	47
3.1.6 SOLIDEZ DE AGREGADOS POR MEDIO DE SULFATO DE MAGNESIO	50
3.1.7 CONTENIDO DE ASFALTO.....	55

3.1.8 PARTICULAS DE PET	58
3.2 MUESTRAS DE MEZCLAS CON DIFERENTES PROPORCIONES DE PET	60
3.2.1. DISEÑO DE LA MUESTRA A-0% (SIN PET).....	61
3.2.2. DETERMINACIÓN DE PORCENTAJES DE PET RESPECTO AL VOLUMEN DE LA MUESTRA.....	63
3.2.3. DISEÑO DE PRUEBAS CON PORCENTAJE DE PET	64
3.2.7 CÍRCULO DE ARENA.....	67
3.3 PRUEBAS DE DESGASTE	68
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	71
CONCLUSIONES	76
REFERENCIAS.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Accidentes de tránsito terrestre en México.....	16
Figura 2. Total, de víctimas.....	16
Figura 3.Estructura de un pavimento flexible.....	18
Figura 4. Estructura de pavimento rígido.....	19
Figura 5.Pasajuntas en losa de concreto.....	20
Figura 6. Macro y micro textura.....	21
Figura 7.Mixing Temperature (for HDPE Asphalt Cement Mix).....	24
Figura 8. Missing Temperature Mixing Time (For HDPE Asphalt Cement Mix).....	25
Figura 9. Histéresis y Adhesión.....	29
Figura 10. Diagrama metodología.....	30
Figura 11. Peso de material microdeval ¼” A) Peso de material 3/8”B), Peso de material #4 C), Peso de material 3/8”, ¼”, #4 combinados D). Fuente: Propia.....	35
Figura 12. Cinco kilogramos de balines de acero.....	36
Figura 13. Cuarteo equivalente de arena.....	37
Figura 14. 85cm ³ de solución para preparar solución de trabajo.....	38
Figura 15. Realización de solución de trabajo.....	38
Figura 16. 80cm ³ de muestra agregado pétreo fino.....	39
Figura 17. Solución 4”.....	40
Figura 18. Tiempo en cero. Fuente.....	40
Figura 19. Tiempo de reposo 10 minutos.....	41
Figura 20. Temporizador 30 segundos.....	41
Figura 21 Colocación de muestra.....	42
Figura. 22 Agitado equivalente de arena.....	42
Figura 23. Tiempo de reposo 20 minutos.....	43
Figura 24. No se observan arcillas.....	44
Figura 25. Altura de arena.14.6-10.....	44
Figura 27. Peso inicial.....	46
Figura 28. Después de pasar por máquina de los Ángeles.....	48
Figura 29. Agregado pétreo desgastado por máquina de los Ángeles.....	49
Figura 30. Peso retiene la malla #12”.....	49
Figura 31Cuarteo.....	50
Figura 32 Muestra total A), Retiene malla ¾”.B), Retiene malla ½” C), Retiene malla 3/8” D), Retiene malla ¼”.E), Retiene malla #4 F), Retiene malla #6 G).....	52

Figura 33 Retiene malla #8.	53
Tabla 8 Tamaño de agregado solidez de agregado pétreo.....	54
Figura 34 500gr retiene malla ½”.....	54
Figura 35. 350g de sulfato de magnesio en un litro de agua.	55
Figura 36. Sumergida intemperismo acelerado 500gr retiene ½” + 300g pasa #4.....	55
Figura 38. Peso de charola sin material.....	56
Figura 37. Después de intemperismo con sulfuro de magnesio.	56
Figura 39. Material secándose en estufa para pesarse.	57
Figura 40. Agregado seco segundo día con peso de charola.	57
Figura 41. Peso flanera sin cemento asfáltico.	58
Figura 42. Peso solo de emulsión.....	59
Figura 43. Peso flanera y emulsión.	59
Figura 44 Tiempo de secado en horno emulsión.....	60
Figura 45. Peso final de cemento asfaltico.....	61
Figura 46. Cribado de PET.....	62
Figura 47. Peso de la emulsión asfáltica antes del proceso de evaporación de agua.	64
Figura 48. Asfalto sin agua ni emulsificante.	65
Figura 49 Material pétreo para primera muestra.	66
Figura 50. Contenido de emulsión asfáltica prueba A.	66
Figura 51 Prueba A. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 52. Medida inicial de probeta B-2.5% sin PET.....	69
Figura 53 Medida de 6.67ml de PET.	70
Figura 54 Cantidad de agregado pétreo prueba B.	71
Figura 55. Emulsión en la mezcla.	71
Figura 56. Medición de macrotextura.	72
Figura 57. Pesos de muestras secas.	74
Figura 58 Muestra en remojo.	75
Figura 59. Maquina batidora Hobart N-50.....	76
Tabla 24. Circulo de arena antes de la prueba destructiva prueba 2.	82
Figura 60. Pérdida de agregado.....	85
Figura 61. Pérdida de macrotextura.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de textura.....	20
Tabla 2. Polímeros y su punto de fusión.....	23
Tabla 4. Resultados de control de calidad emulsión asfáltica.....	33
Tabla 6. Composición de la muestra.....	47
Tabla 7 Granulometría.....	51
Tabla 9. Granulometría de PET.....	62
Tabla 10 Volumen de muestras.....	68
Tabla 11. Cantidad de botellas usadas por muestra.....	68
Tabla 12. Cantidad de botellas por requeridas por m ² de tratamiento.....	68
Tabla 13 Resultados de volumen de las muestras.....	73
Tabla 14. Macrotextura de las muestras sin ensayar.....	73
Tabla 15. Duración del ensayo.....	75
Tabla 16. Costos por m ² de superficie de rodamiento con PET.....	78
Tabla 17. Resultados de caracterización de material pétreo.....	79
Tabla 18. Pesos antes de desgaste prueba 1.....	80
Tabla 19. Pesos Después del desgaste prueba 1.....	81
Tabla 20. Círculo de arena antes de prueba destructiva prueba 1.....	81
Tabla 21. círculo de arena después de prueba destructiva.....	81
Tabla 22. Pesos antes de prueba destructiva prueba 2.....	82
Tabla 23. Pesos después de la prueba destructiva.....	82
Tabla 24. Círculo de arena antes de la prueba destructiva prueba 2.....	82
Tabla 25. Círculo de arena después de prueba destructiva.....	83
Tabla 26. Pesos antes de pruebas destructivas prueba 3.....	83
Tabla 27. pesos después de pruebas destructivas prueba 3.....	83
Tabla 28. Círculo de arena antes de prueba destructiva prueba 3.....	84
Tabla 29. Círculo de arena después de prueba destructiva prueba 3.....	84

INTRODUCCIÓN

La resistencia al deslizamiento en los pavimentos de asfalto representa un elemento crítico que impacta directamente en la seguridad y eficiencia del tráfico vehicular. La capacidad de la superficie del pavimento para asegurar una adecuada adherencia entre los neumáticos y la carretera es esencial para prevenir accidentes asociados con deslizamientos. Varios estudios han indicado que un considerable porcentaje de incidentes de tránsito resultan de una insuficiente resistencia al deslizamiento en la capa de rodadura del pavimento.

En este contexto, la macrotextura del pavimento juega un papel esencial. Mantener una macrotextura óptima no solo extiende la vida útil del pavimento, sino que también favorece un frenado más eficaz y facilita el drenaje rápido del agua en la superficie. La combinación de polímeros con mezclas asfálticas ha surgido como una estrategia prometedora para mejorar las propiedades de resistencia al pulimento y desgaste en la superficie de rodadura.

Este estudio se enfoca en evaluar diversas proporciones de polímeros incorporados en mezclas asfálticas, con el propósito de desarrollar materiales que no solo cumplan con los estándares de resistencia al deslizamiento, sino que también contribuyan a la preservación de la macrotextura. La caracterización de agregados pétreos y emulsiones asfálticas se llevará a cabo según las normativas establecidas por la International Slurry Surfacing Association (ISSA), la cual regula las capas de mejora superficial en pavimentos asfálticos.

1.1 ANTECEDENTES

Alrededor del 95 % de los pavimentos en el mundo son flexibles (Gautam et al., 2018). Constan de capas, las cuales son la carpeta asfáltica, base, subbase y subrasante, siendo la superficie del pavimento la que tiene un mayor desgaste, debido al intemperismo meteorológico en que se encuentran, además está en contacto directamente con los neumáticos de los vehículos que transitan sobre el pavimento. Con el tiempo, estos factores provocan un fenómeno llamado pulimiento, el cual genera problemas de derrape en los neumáticos y reduce la eficacia del desalojo del agua.

Como indican Pranjić et al., (2020), la textura de la superficie del pavimento es una de las propiedades que contribuyen a la realización de la resistencia al deslizamiento, siendo muy importante para el frenado de vehículos. La combinación de buena fricción, bajos niveles de rugosidad y bajos niveles de ruido es importante en el diseño de una superficie de desgaste de

pavimento (Flintsch et al., 2012).

Entre los tipos de textura del pavimento asfáltico, el nivel de microtextura contribuye a una resistencia al deslizamiento a baja velocidad y superficie de pavimento seco, mientras que el nivel de macrotextura contribuye a una resistencia al deslizamiento en alta velocidad y una superficie de pavimento húmedo (Vaiana et al., 2012). Al tener una superficie más rugosa se desaloja de mejor manera el agua, evitando el acuaplaneo y reduciendo el tiempo de frenado comparado con la microtextura, lo que mejora el confort del usuario. No obstante, al tener una superficie más rugosa también se tiene un mayor desgaste en los neumáticos del vehículo, además de un ruido más alto al circular. Sin embargo, el aspecto negativo de un incremento de la fricción del pavimento es superado por el potencial decremento de los accidentes ((Flintsch et al., 2012).

India es uno de los países que más ha empleado mezclas asfálticas con polímeros para construir pavimentos flexibles. De acuerdo a Vasudevan et al., (2012) se colocaron más de 2500 km de carreteras con carpetas asfálticas mezcladas con polímeros desde 2002 hasta la fecha, los caminos se han desempeñado exitosamente, con un costo menor a la carpeta sin polímeros.

Se ha buscado solucionar el pulimiento, colocando riegos de sello, los cuales tienen altos costos de aplicación y un tiempo de vida útil bastante corto. Buscando otras alternativas más económicas, se han realizado investigaciones de materiales alternativos al asfalto convencional y los materiales pétreos de banco.

Los experimentos realizados por (Cui et al., 2020), descubrieron que utilizando escoria de acero en las superficies de carreteras aumenta su resistencia al desgaste, se empleó dicho material para mejorar la macrotextura en la superficie de rodamiento, teniendo como resultado un excepcional rendimiento antideslizante en comparación con los áridos naturales.

Por otra parte, Fuentes-Audén et al., (2008) se dieron cuenta que con mezclas de polímero de alta densidad al 5% del peso total de la mezcla teniendo un asfalto 150/200, dieron como resultado mejoras en las propiedades de fluidez esperadas para el concreto asfáltico. Mientras que Ali M. Babalghaith et al., (2016) realizaron mezclas de pirolisis de polietileno de baja densidad con cemento asfáltico percatándose que el punto de reblandecimiento tiende a acrecentar con el aumento en proporción del polietileno de baja densidad. Así mismo Hnsloğlu & Açar, (2004) experimentaron con pruebas de mezclas asfálticas con polietileno de alta densidad a diferentes

temperaturas, concluyeron que la mezcla con un porcentaje de 4% de polietileno de alta densidad a 165°C por 30 minutos se obtuvo una estabilidad alta y un flujo bajo. Siendo la combinación con los mejores resultados obtenidos.

En este sentido Fuentes-Audén et al., (2008) afirman que dichos polímeros reciclados pueden sustituir a los polímeros vírgenes empleando agentes modificadores del betún. Estos materiales tienen características que, en la proporción adecuada, mejora las propiedades mecánicas y reológicas de la mezcla asfáltica. En gran medida son vistos como material de un solo uso para múltiples industrias, por lo que son más económicos que el asfalto usado para la construcción de pavimentos flexibles, en consecuencia, genera un ahorro en el costo total del proyecto. Por otro lado, desde un punto de vista ambiental, la modificación del betún con residuos plásticos es una buena forma lograr eliminar residuos (Fuentes-Audén et al., 2008)

Segundo et al., (2021) indican que la pérdida de macrotextura es el factor de deterioro más crítico, hablando, de los tratamientos con mezclas bituminosas y agregados pétreos, siendo muy importante la adherencia del material y la viscosidad para un funcionamiento óptimo, además, la seguridad en el manejo también depende de una adecuada superficie de fricción para maniobrar un vehículo, girando y frenando (Flintsch et al., 2012), en ambos casos la fricción es determinante para darle al usuario una mayor seguridad al conducir.

La mayoría de los estudios usando polímeros y mezclas asfálticas que se han realizado se han enfocado a carpetas asfálticas estructurales, y no a mejorar la capa de rodamiento como tal, no tomándose en cuenta características importantes como la macrotextura.

Entre varios tratamientos preventivos el micro pavimento es cada vez más utilizado, dada su simple construcción, alta eficiencia de producción y excelente desempeño (Cui et al., 2020). En algunas ocasiones, el pavimento tiene una estructura saludable, disipando correctamente los esfuerzos, pero en carreteras de altas especificaciones clasificadas así por la Secretaría de Infraestructura Comunicaciones y Transportes (SICT) eso no es suficiente, ya que se tiene que cumplir con estándares de confiabilidad y seguridad en la superficie de rodadura, como lo es el coeficiente de fricción, la macrotextura y el índice de rugosidad internacional, por mencionar algunos. (Hnsloğlu & Ađar, 2004) afirman que la adición de materiales de desecho como ciertos polímeros a los aglutinantes de asfalto pueden mejorar el rendimiento de concreto asfáltico, los cuales pueden incrementar la vida útil y disminuir la accidentabilidad por derrape, al desarrollar una superficie

de rodamiento que proporcione rangos de macrotextura con alta.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La superficie del pavimento asfáltico, con el paso de los vehículos tiende a desgastarse y desprender los agregados más expuestos, generando pulimento. Este pulimento es una consecuencia negativa y un motivo de mantenimiento para las empresas de conservación de caminos. Los costos son elevados y causan tiempos de retraso en los vehículos lo que conlleva, en consecuencia, pérdidas económicas mayores para los transportistas y usuarios en general. El exceso de peso en los vehículos no está controlado en su totalidad, de manera que el desgaste en la superficie de pavimento es evidente, teniendo un contacto inadecuado entre el vehículo y la capa superior.

El material usado para esta investigación beneficia a la nación, reduciendo los costos de mantenimiento, y a los usuarios, disminuyendo los costos de operación y evitando demoras por obras de rehabilitación de la superficie de la vía. El material permite una mayor durabilidad en la macrotextura, que una de sus características principales es el desalojo eficaz del agua.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Existe un fenómeno llamado acuaplaneo, el cual se genera cuando una película de agua cubre la superficie del pavimento, generando un derrape en el vehículo, por lo cual el agua es un factor peligroso para el tránsito de vehículos en las carreteras del país.

De acuerdo con Rodríguez, (2009), se ha estimado que aproximadamente el 35% de los accidentes en Estados Unidos son causados, al menos parcialmente por derrapes, mientras que una mejora del 10% en el nivel de resistencia al deslizamiento reduce los accidentes por derrape en un 13%.

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2020), los accidentes en carreteras mexicanas han ido en aumento, siendo el año 2007 cuando se presentó el mayor número de accidentes, como se muestra en la Figura 1., mientras que las cifras de víctimas se han mantenido similares en los últimos 8 años, como se observa en la Figura 1.3.2

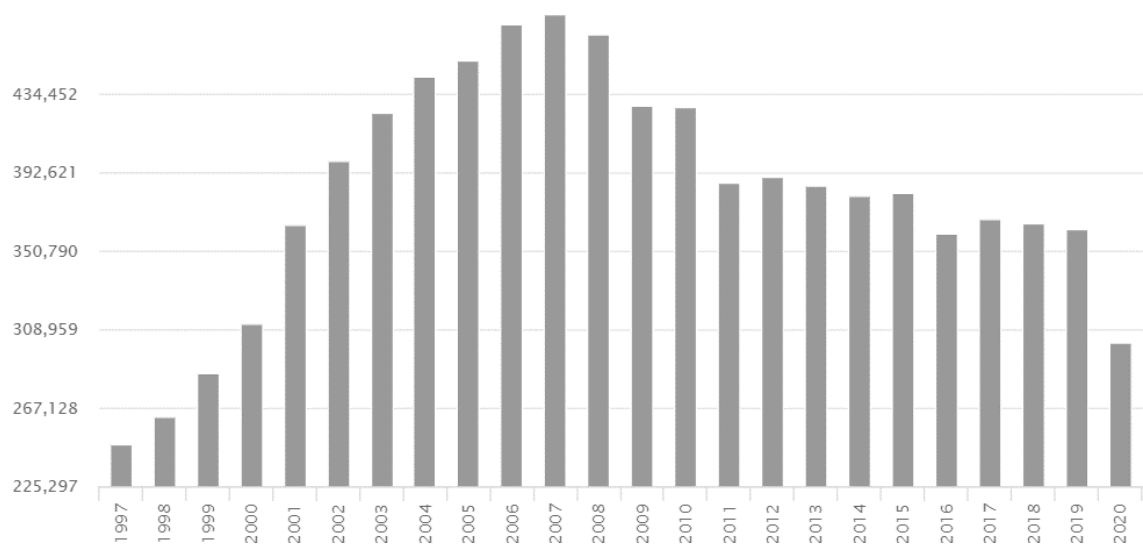


Figura 1 Accidentes de tránsito terrestre en México. Fuente: INEGI (2020)

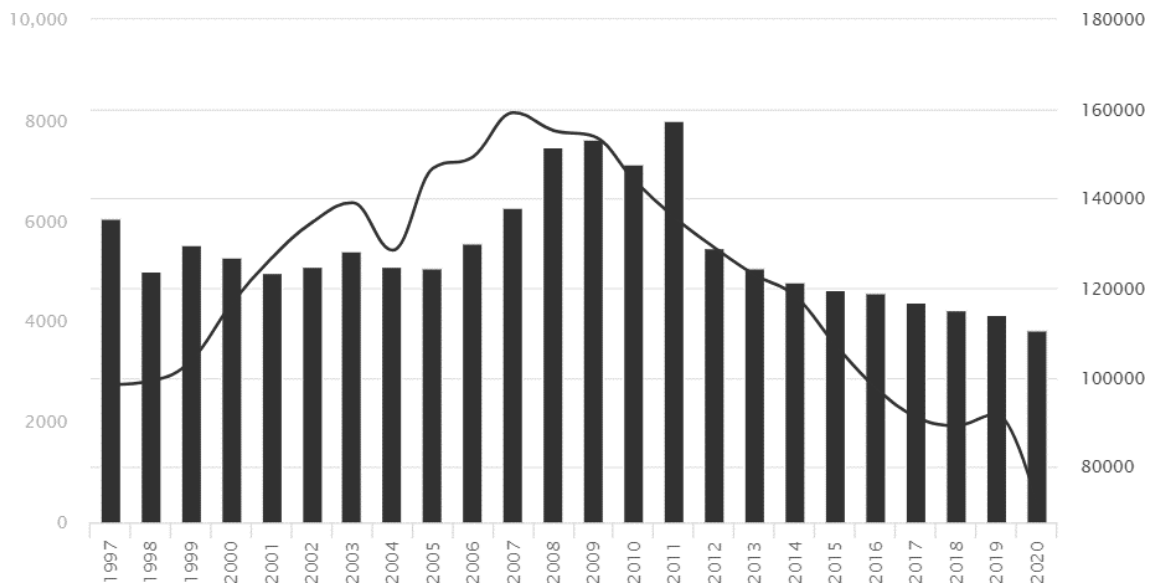


Figura 2. Total, de víctimas. Fuente: INEGI 2020

Por otro lado, el uso de polímeros en el mundo ha ido en aumento. En 1907, la bakelita fue el primer plástico sintético en producirse (Amirkhanian, 2020), de manera acelerada la producción de plástico se fue incrementando con el paso de los años, teniendo beneficios en tiempo y costo de producción con respecto a otros materiales. Esto fue causando que se usara como material de un solo uso, desechándolo rápidamente. Se estima que, en 2018, cerca de 9 billones de toneladas de plásticos fueron producidas en el mundo, esto es más de 1.2 toneladas por persona (Amirkhanian, 2020)

1.4HIPOTÉISIS

Al usar material asfáltico en frío mezclado con fibras de PET se obtiene una resistencia al desgaste mayor en un 15% a la superficie de pavimento convencional medible con Normativa ISSA, incrementando así la vida útil de la superficie de rodamiento.

1.5OBJETIVOS

Lograr un material para tratamiento superficial más resistente al desgaste para mejorar la macrotextura en superficies de pavimentos flexibles.

1.5.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Encontrar la proporción adecuada de Emulsión/PET que brinde el mejor desempeño al desgaste, variando los porcentajes de PET del 0% al 10%.

Evaluar el impacto ambiental positivo de la incorporación de hojuelas de PET reciclado en mezclas asfálticas, mediante la reducción del consumo de recursos naturales y la mitigación de la acumulación de residuos plásticos en vertederos, con el fin de promover prácticas sostenibles en la construcción de carreteras.

2.ESTADO DEL ARTE

El presente capítulo presenta una introducción a los conceptos básicos de pavimentos, sus tipos y modo de funcionamiento, las texturas de las superficies y dónde es recomendable emplearlas, Algunos estudios previos que se han realizado con mezclas asfálticas usando polímeros, las mezclas ya existentes y, por último, se aborda el tema de la rugosidad en los pavimentos debido a la importancia que tiene en el desgaste de los vehículos.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

Un pavimento es una superficie artificial con una estructura de capas de materiales pétreos, que en conjunto trabajan para disminuir los esfuerzos producidos por cargas dinámicas al suelo natural, por ello se deben de colocar los materiales de mayor calidad en las capas superiores del pavimento.

En palabras de Huang (2004) existen tres tipos de pavimentos principales: el pavimento flexible, rígido y compuesto, diferenciándose unos de otros por su materiales y funcionamiento. El pavimento flexible consta de una carpeta asfáltica en su superficie de rodamiento, el rígido de una losa de concreto y el compuesto lleva una combinación de ambos en su estructura. Los términos flexible y rígido se relacionan con la forma en que los pavimentos de asfalto y concreto portland respectivamente, transmiten la tensión y la deflexión a las capas adyacentes. (Papagiannakis et al., 2008).

2.1.1. PAVIMENTO FLEXIBLE

Los pavimentos flexibles constan de una estructura formada por capas: una carpeta asfáltica en la parte superior del pavimento, seguido de una base hidráulica, una subbase y finalizando con una subrasante como se muestra en la Figura 5.1.1. Papagiannakis et al., (2008) indican que algunas superficies de pavimento asfáltico consisten en un simple tratamiento superficial bituminoso, mientras que otros pavimentos con superficie asfáltica de uso más liviano son demasiado delgados para ser considerados como pavimentos flexibles (espesores de capa combinados menores a 15 cm)

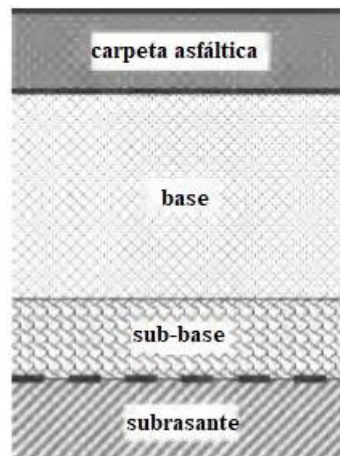


Figura 3. Estructura de un pavimento flexible. Fuente: Elaboración propia a partir de (Papagiannakis et al., 2008)

De manera ideal una superficie flexible debería transmitir de manera uniforme los esfuerzos y no uniforme las deflexiones (Papagiannakis et al., 2008), la capa superior al ser de mejor calidad soporta esfuerzos de manera más directa que las capas inferiores distribuyéndolos.

2.1.2. PAVIMENTO RÍGIDO

Un pavimento rígido tiene una estructura constituida por una losa de concreto portland, seguida de una base y finalizando con una subrasante como se muestra en la Figura 4. En un pavimento rígido la función principal de la losa de concreto es estructural (Rondón et al., 2015), distribuye los esfuerzos de una manera más amplia que los pavimentos flexibles que los distribuyen de manera puntal, además reduce los esfuerzos a la subrasante de gran medida.

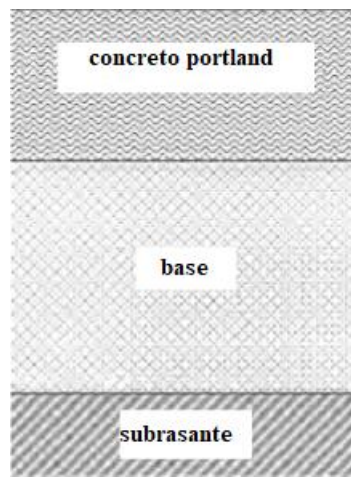


Figura 4. Estructura de pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia a partir de (Papagiannakis et al., 2008)

Las losas de concreto requieren cortes en la parte superior, ya que el concreto hidráulico tiende a agitarse por los esfuerzos inducidos y los cambios de temperatura, generando fisuras. Al cortar la losa transversalmente y colocar pasajuntas de acero, se guía a la grieta hacia donde debe formarse, como se muestra en la Figura 5..

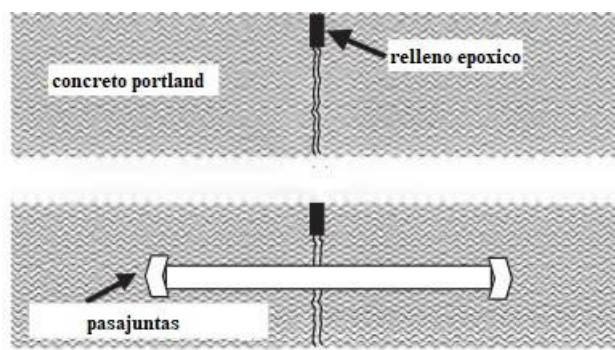


Figura 5. Pasajuntas en losa de concreto. Fuente: Elaboración propia a partir de (Papagiannakis et al., 2008)

2.2. TEXTURAS DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO

La textura del pavimento está categorizada en rangos basados en longitud de onda de los componentes: microtextura, macrotextura y megatextura (Flintsch et al., 2012). Como se muestra en la Tabla 5.2.1 La megatextura es indeseada en cualquier tipo de pavimento. Se circula a una velocidad muy baja debido a las imperfecciones y su alto desgaste en los neumáticos, ocasionando a la vez un ruido molesto al circular por la vía.

Tabla 1. Clasificación de textura. Fuente: Elaboración propia a partir de Flintsch et al., (2012) |

Clasificación de textura	Tamaño
Microtextura	$1 < 0.5\text{mm}$
Macrotextura	$0.5\text{mm} < 150\text{mm}$
Megatextura	$50\text{mm} < 1 < 500\text{mm}$

Según Flintsch et al., (2012) microtextura se refiere a una escala pequeña de textura en los agregados del pavimento y se caracteriza por longitudes de onda más cortas que 0.5 mm y

amplitudes máximas generalmente entre 0.001 y 0.5mm. Siendo un pavimento visto como liso con una carpeta cerrada, adecuado para zonas urbanas y de baja velocidad, la textura de los agregados es lo que le brinda esa rugosidad al pavimento

Se podría interpretar que la textura es consecuencia de las características del agregado, siendo en la macrotextura el tamaño, y la microtextura la rugosidad tal como se muestra en la Figura 6.

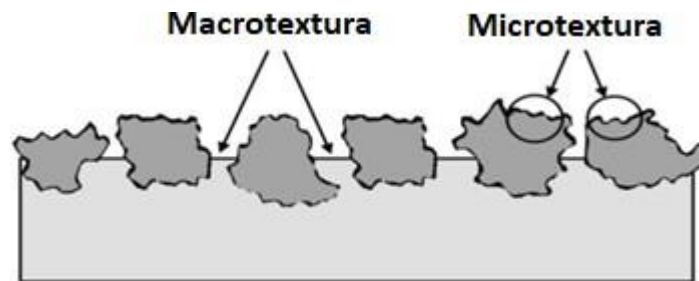


Figura 6. Macro y micro textura. Fuente: Elaboración propia a partir de Flintsch et al., (2012)

Sobre pavimento seco con buena textura, el neumático envuelve la textura, sin embargo, si está mojada, el agua puede prevenir parcialmente la penetración si no es profunda la textura (Flintsch et al., 2012) a ese efecto se le llama hidropelaje, el cual es muy peligroso en la carretera incrementándose los accidentes, una macrotextura ayuda a desalojar el agua de una manera más rápida que una microtextura, evitando mayormente el fenómeno indeseado.

Para medir la rugosidad de la superficie del pavimento se divide en 2 rubros, mediciones estáticas y mediciones dinámicas. Como medición estática se emplea el círculo de arena (the sand patch method) que es un método volumétrico el cual está regido por la normativa ASTM E-965 y por la M-MMP-4-07-009 de la Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (SICT), se basa en un volumen conocido de un material de grano fino que se esparce con un disco de goma sobre la superficie del pavimento para formar una mancha aproximadamente circular. En la actualidad la forma más usada para medir la macrotextura es con dispositivos montados en un vehículo.

El coeficiente de fricción es otro parámetro con gran importancia en la superficie de pavimento, siendo medido con la distancia de frenado total de un vehículo, con una tasa de desaceleración y el

péndulo inglés, siendo este último el que se usa mayoritariamente en México regido por la normativa N-CSV-car-1-03-007/17. Esto para distancias cortas y de baja velocidad, para distancias más largas se usan equipos de medición laser. La variación estacional tiene un efecto significativo en las mediciones de fricción del pavimento (Rodríguez, 2009) ya que se tienen valores más altos en los meses de frío. Sin embargo, estudios realizados por Sesen (2013) demuestran que el coeficiente de fricción tiene una correlación de 0.31 midiendo a velocidades de 20 km/h con equipo laser, 0.3274 a 40 km/h, 0.3523 a 60 km/h y 0.0881 a 80 km/h, siendo una correlación muy baja, con lo cual se concluye que la relación de macrotextura con índice de fricción es casi nula.

2.3 USO DE POLÍMEROS EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Singh et al., (2022) indican que agregar polímeros a los aglutinantes asfálticos ayuda a mejorar la unión entre el agregado y el aglutinante, propiedades que se buscan para mantener una adecuada macrotextura y evitar el pulimiento acelerado en la superficie del pavimento. Asimismo, se encontró que los residuos plásticos desechados por el sector doméstico son una fuente de materia prima para el pavimento flexible. (Vasudevan et al., 2012). Existen dos enfoques para incorporar polímeros reciclados a las mezclas asfálticas el proceso húmedo y el proceso seco (Ma et al., 2021). El proceso seco consiste en agregar los polímeros en estado sólido para que funcionen como agregado pétreo. Mientras que en el húmedo los polímeros se calientan a una alta temperatura en conjunto con el asfalto para mezclarse entre sí y formar un aglutinante, la temperatura puede variar dependiendo del tipo de polímero a utilizar, y las propiedades que se quieren lograr, en la Tabla 2 se pueden observar algunos polímeros y su punto de fusión. Tabla 2 Polímeros y su punto de fusión. Fuente: Elaboración propia a partir de (Ma et al., 2021)

Tabla 2. Polímeros y su punto de fusión. Fuente: Elaboración propia a partir de (Ma et al, 2021)

TIPO DE POLÍMERO	PUNTO DE FUSIÓN EN (°C)
Polietileno de alta densidad (HDPE)	130-149
Polietileno de baja densidad lineal (LLDPE)	125
Polietileno de baja densidad (LDPE)	110-120
Polipropileno (PP)	160-165
Poliestireno (PS)	210-249
Cloruro de polivinilo (PVC)	100-260
Acetato de estilo vinilo (EVA)	75-102
Teraflato de polietileno (PET)	250-255

En Hnslođlu & Ađar, (2004) se reportan los resultados de una investigaci3n sobre mezclas asfálticas con polietileno de alta densidad, con el objetivo de incrementar el periodo de servicio del concreto asfáltico, reducir costos y residuos reciclando. La prueba consistió en diferentes mezclas asfálticas con porcentajes de polietileno de alta densidad del 0%, 4%, 6% y 8% por peso 3ptimo de concreto asfáltico, con un aglutinante base AC-20 a 145°C, 155°C o 165°C por un tiempo de 5, 15 y 30 minutos. Concluyeron que la mezcla con un porcentaje de 4% de polietileno de alta densidad a 165°C por 30 minutos se obtuvo una estabilidad alta y un flujo bajo, además que tiene una mayor resistencia a la producci3n de baches. Y que con un 6% a una temperatura de 145°C por 5 minutos se obtuvo una estabilidad baja y un flujo alto. Como se muestran en las Figuras 5.3.1 y Figura 5.3.1.

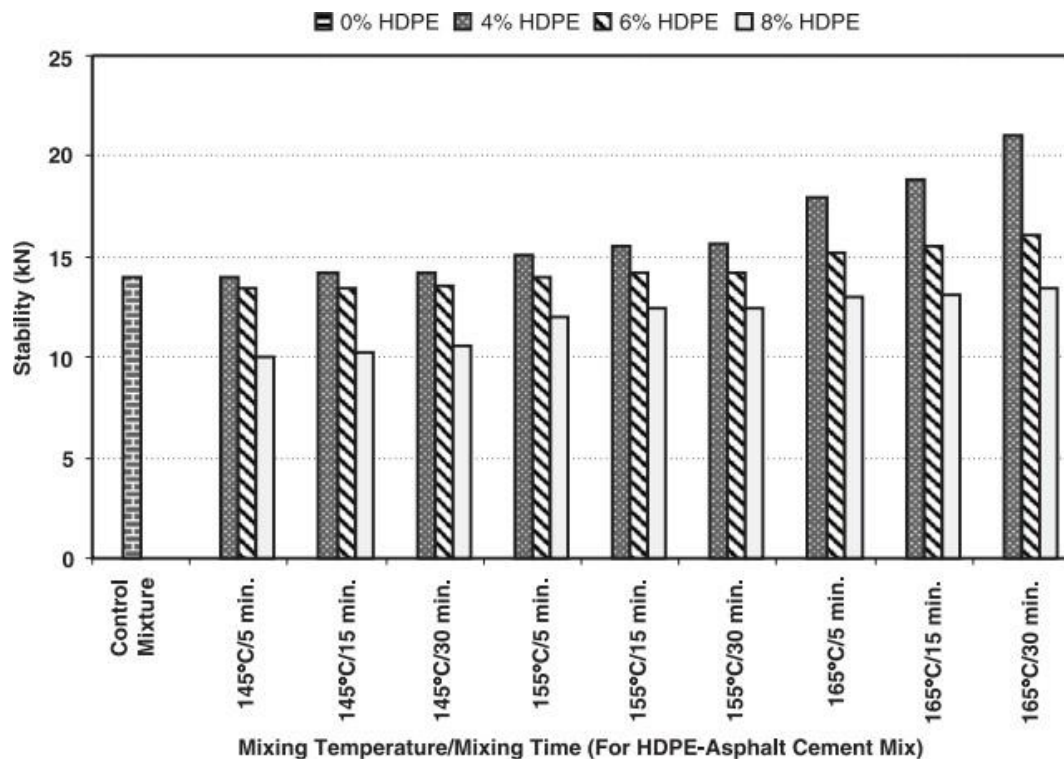


Figura 7. Mixing Temperature (for HDPE Asphalt Cement Mix). Fuente: Hnslođlu & Ađar, (2004)

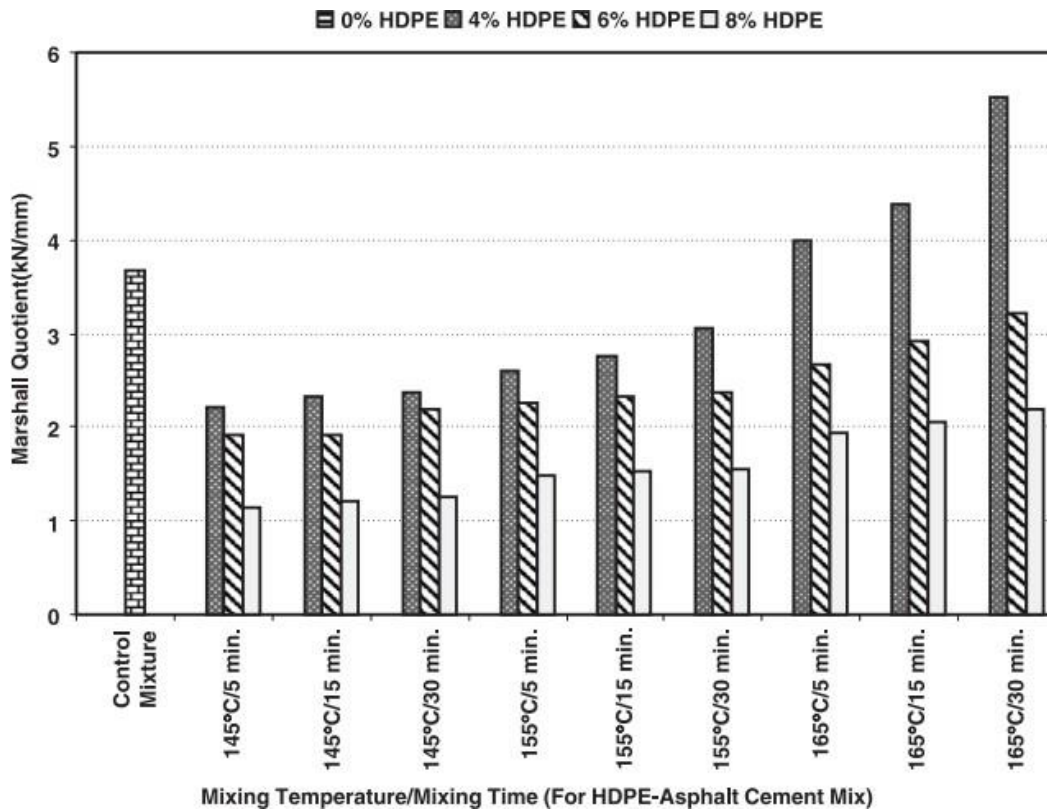


Figura 8. Mising Temperature Mixing Time (For HDPE Asphalt Cement Mix).

Fuente: Hnsloğlu & Açar, (2004)

Fuentes-Audén et al., (2008) publicaron un artículo donde prepararon una mezcla asfáltica con cemento asfáltico donado por Repsol, de grado de penetración 150/200 y polietileno reciclado. Se prepararon diferentes mezclas a 180°C, variando el porcentaje de polímeros con respecto al peso total de la mezcla, con concentraciones desde 2%, hasta 50% de polímeros. Como resultado se dieron cuenta que la penetración a 25 °C generalmente disminuirá a medida que aumente el contenido de polietileno de alta densidad, indica una mejor resistencia al corte en temperaturas medias a altas, el punto de reblandecimiento tiende a aumentar con la adición de contenido de polietileno de alta densidad, lo que indica una mejora en la resistencia a la deformación, se puede obtener un pavimento flexible con buen rendimiento y más económico con un 5% de polietileno de alta densidad.

Alsolieman et al. (2021) realizaron un artículo donde se utilizó pirólisis de polietileno de baja densidad (PLDPE, por sus siglas en inglés), para preparar mezclas asfálticas en diferentes proporciones de PLDPE: 0%,3%,6%,9% y 12% en términos de cemento asfáltico por peso. Se sometió a pruebas de: penetración, ductilidad, punto de ablandamiento, gravedad específica, viscosidad, rigidez, compatibilidad y envejecimiento, obteniendo los siguientes resultados: la penetración a 25°C generalmente decrece cuando los contenidos de PLDPE incrementan, lo que indica una resistencia al corte mayor en temperaturas medias y altas. La ductilidad se mantuvo en un rango mínimo de las especificaciones ASTM. El punto de reblandecimiento tiende a aumentar con la adición de PLDPE. El polímero mejora la viscosidad, haciendo más rígida la mezcla, probablemente reduciendo las roderas y empuje en las mezclas en caliente.

Rahman & Wahab, (2013) publicaron un artículo de investigación donde se empleó PET como sustituto de un porcentaje de agregados finos en una mezcla asfáltica usando un asfalto con grado de penetración 60/70, el agregado de PET con medida de 3mm logró sustituir el 20 % de agregado fino pétreo, teniendo como resultado una reducción de costos, aumentando la vida útil de servicio del pavimento especialmente en términos de deformaciones permanentes.

Entre los diferentes polímeros existen ventajas y desventajas conforme al desempeño esperado en un pavimento, en palabras de Yildirim (2007), el caucho natural mejora la resistencia a la formación de surcos y la ductilidad, pero es sensible a la descomposición y a menudo tiene problemas de compatibilidad, mientras que el uso de caucho de llantas como modificador de asfalto es ambientalmente responsable y da como resultado una disminución de la formación de baches y agrietamiento reflexivo, pero en condiciones especiales, tales como altas temperaturas de mezcla, necesitan ser mantenidas para prevenir la separación del ligante asfáltico.

El asfalto normalmente contiene alrededor de: 80% de carbono; 10% de hidrógeno; hasta 6% de azufre; 6.5% asfáltenos; 0.51% pequeñas cantidades de oxígeno y nitrógeno; y metales como hierro 33 ppm, níquel 18 ppm, vanadio 39 ppm, cobre <1 ppm (Attaelmanan et al., 2011), es un material muy complejo de color café muy oscuro a negro. Se clasifican en dos tipos, tipo sol y tipo gel, diferenciándose por su contenido de asfáltenos, siendo el tipo gel el que tiene más asfáltenos.

2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Rondón et al. (2015) mencionan que el cemento asfáltico se designa por las letras CA o AC (por sus siglas en inglés *Asphalt Cement*) y se clasifican por su consistencia con pruebas de penetración y viscosidad. En años recientes, se ha venido utilizando otra clasificación denominada grado de funcionamiento o grado PG por sus siglas en inglés *Performance Grade*, que mide su nivel de desempeño a diferentes temperaturas.

El cemento asfáltico se evalúa por la prueba ASTM D5-06, 2006; de acuerdo a la norma se selecciona una muestra de cemento asfáltico y se calienta a menos de 60°C por 30 minutos evitando que se formen burbujas, posteriormente se coloca la muestra en dos capsulas con una profundidad de por lo menos 10mm, se ingresan las muestras a un baño maría para reducir su temperatura a 25 C ° durante 1 hora, el equipo debe de estar calibrado y se coloca la aguja apenas tenga contacto con el material, se realizan al menos 3 penetraciones con el penetrómetro con una separación de 10mm en cada muestra, posteriormente se promedian los resultados.

5.5.1 MEZCLA OPEN GRADE

Las mezclas asfálticas *open grade* son diseñadas especialmente para facilitar el drenaje, con agregados de tamaño uniforme. De acuerdo con *Asphalt Institute.*, (2014) las mezclas de base están compuestas típicamente de ¾” a 1” (19 a 25 mm) de tamaño máximo nominal de agregado, mientras que las mezclas superficiales típicamente están compuestas 3/8” a ½” (9.5 a 12.5 mm) de tamaño máximo del agregado.

Las mezclas *open grade* de base también son conocidas como ATPB por sus siglas en inglés *Asphalt Treated Permeable Base*. La base no cumple la función de superficie de rodadura por esta razón no es necesarios considerarse agregado que tenga una alta resistencia al deslizamiento (*Asphalt Institute.*, 2014). Sin embargo, no debe de ser suave o que se rompa con facilidad, ya que al desprender agregados finos estos pueden obstruir los espacios diseñados para el drenaje. Normalmente el asfalto usado en mezclas *open grade* para base no requiere ser modificado con polímeros.

Las mezclas superficiales OGFC por sus siglas en inglés *Open Graded Fiction Course*, son mezclas de granulometría abierta que además de permitir drenar el agua rápidamente generan una

rugosidad superficial que ayuda a evitar el deslizamiento de los vehículos, al enviar el agua a una capa permeable del pavimento reduce el hidroneo. La graduación del agregado es un factor muy importante para asegurar los altos niveles de permeabilidad en el diseño de mezclas open grade (*Asphalt Institute.*, 2014).

2.5 INFLUENCIA DEL VEHICULO EN LA RUGOSIDAD

Además del diseño geométrico de una carretera, la resistencia al deslizamiento de un pavimento es otro elemento que interfiere de manera directa en la seguridad del camino (TRB, 2011; Wambold et al., 1986) para lo cual se han realizado estudios tanto en pavimento mojado como en pavimento seco. Fwa, (2021) menciona que el desarrollo de dispositivos para las pruebas de resistencia al deslizamiento del pavimento comenzó en 1920, se dieron cuenta que los vehículos alcanzaban velocidades cada vez más altas provocando problemas con el frenado a causa de deslizamiento.

En la década de 1960 y a inicios de los setentas se observaron las características del comportamiento a la resistencia al deslizamiento del pavimento bajo tres parámetros clave, neumáticos, pavimento y escurritía superficial (Horne & Joyner, 1966; Meyer & Kummer, 1969; Moore & Geyer, 1972; Sabey, 1966). Con estas investigaciones se dieron cuenta entre otros aspectos que debido a que los deterioros del pavimento causado por el pulido del tráfico, la resistencia al deslizamiento de los pavimentos en servicio disminuiría con la edad, que la resistencia al deslizamiento varia con un espesor de película de agua, la estructura, dimensiones y el dibujo del neumático además de la presión de inflado y viscoelasticidad del caucho, las propiedades viscoelásticas del caucho depende de la temperatura es menor cuando la temperatura es alta, la presencia de contaminantes como polvo o lubricantes tienen un efecto significativo en la resistencia al deslizamiento.

Se han identificado cuatro mecanismos que participan en la generación de la fricción del caucho, perdidas por adherencia, perdidas por histéresis, perdidas por cohesión y perdidas por desgaste (Fwa, 2021), la pérdida de adherencia es la consecuencia de la energía que se asocia a la superación de la resistencia al corte entre el caucho del neumático y la superficie del pavimento, la perdida por histéresis es el resultado de la energía usada en la absorción de la deformación de la estructura del polímero de caucho a medida que el caucho se desliza sobre la rugosidad de la superficie del pavimento como se muestra en la Figura9.

Las pérdidas por desgaste son resultado de paso del tráfico sobre el pavimento que provoca una acción abrasiva, rompiendo el agregado superficial cuando tienen contacto el pavimento y el neumático.

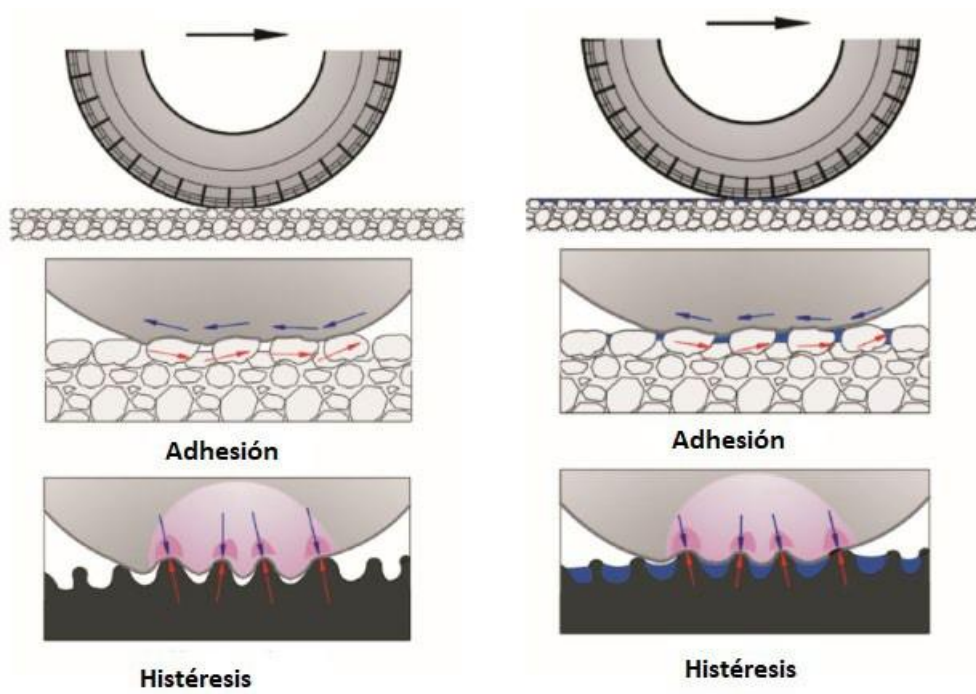


Figura 9. Histéresis y Adhesión. Fuente: Elaboración propia a partir de (Fwa, 2021)

METODOLOGÍA



Figura 10. Diagrama metodología. Fuente: Elaboración propia

Paso 1: Revisión de la bibliografía

En la primera etapa se investiga sobre el estado del arte de los materiales polímeros y pétreos, al igual que los procedimientos constructivos, los tipos de tratamiento a la superficie de los pavimentos, y los resultados obtenidos de los estudios realizados a los diferentes materiales.

Paso 2: Muestreo de los materiales y caracterización de los materiales

Se procede a obtener materiales pétreos de diferente préstamo (banco de materiales) para tener una muestra más amplia de la región.

En tercera instancia se realiza una serie de pruebas a los materiales pétreos para determinar su calidad con base a la normativa ASTM C 136 (Granulometría), ASTM C 131 (Desgaste de los Ángeles), AASHTO T 327 (Desgaste Micro-Deval), AASHTO T 104 (Intemperismo acelerado),

A la emulsión asfáltica se le realizará la prueba de contenido de cemento asfáltico (M-MMP-4-05-012 SCT).

Paso 3: Mezclas en diferentes proporciones

Se toman diferentes proporciones de fibras de PET para mezclarse con emulsión asfáltica, al tener una mezcla de ambos materiales se procede a unir dicha mezcla con materiales pétreos. Las proporciones serán como máximo un 10% de fibras de PET ya que se ha demostrado que más del 10% los resultados no son favorables de acuerdo con el apartado de antecedentes de este documento.

Paso 4: Ensayos destructivos

A las diferentes mezclas se les realizará prueba la prueba de desgaste con base a la normativa ISSA TB100, colocando las pruebas en una maquina batidora adaptada con una manguera en la parte inferior, la cual hará la función de desgastar la pastilla.

Paso 5: Resultados y validación

En las mezclas asfálticas, se espera que tengan como resultado una macrotextura mayor a 0.75 mm con referencia la prueba M-MMP-4-07-009-16. Se comparan los resultados obtenidos con los resultados esperados, obteniendo un panorama de lo obtenido.

3.1. MUESTREO DE MATERIALES

3.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

El agregado pétreo debe cumplir con las características establecidas en la normativa ISSA TB A 105 las cuales se muestran en la Tabla 3.1.1

Tabla 3.1.1 Características para agregado pétreo. Fuente:(INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION, 2010)

Ensayo	MÉTODO DE ENSAYO		Especificación
	AASHTO	ASTM	
Equivalente de arena, suelos y agregados finos	T 146	D 2419	45 mínimo
Solidez de agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	T 104	C 88	15% máximo c/NA ₂ SO ₄ 25% máximo c/MgSO ₄
Resistencia a la degradación de agregado grueso de pequeño tamaño por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles.	T 96	C 131	35% máximo

EL material pétreo utilizado para esta investigación fue donado por la empresa Corporativo AG S.A de C.V y extraído de un banco de material ubicado en la cañada, municipio de el Marqués, en el estado de Querétaro, mientras que el material asfáltico fue donado por la empresa GMC TADA, ubicada en el municipio de Salamanca, estado de Guanajuato.

Además de los procesos de control de calidad que se recomiendan por la normativa anteriormente para agregados pétreos, se propuso complementar este control de calidad con granulometría, partículas alargadas y lajeadas y microdeval. Se obtuvieron resultados favorables, los cuales permitieron diseñar un slurry. Para la emulsión asfáltica la normativa ISSA no recomienda algunas pruebas en específico; por lo tanto, se optó por realizar el control de calidad con pruebas que se le realizan normalmente a la emulsión asfáltica desde su producción. Que dieron como resultado la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados de control de calidad emulsión asfáltica. Fuente: Elaboración propia

Características	Método	Resultado
Contenido de cemento asfáltico	M-MMP-4-05-012 SCT	65.70%
Viscosidad en segundos Saybolt Furol	M-MMP-4-05-009 SCT	98 s
Carga eléctrica de las partículas	M-MM-4-05-017 SCT	Positiva
Retenido en peso malla No 20	M-MMP-4-05-014 SCT	0.00%
Asentamiento en 24 horas	M-MMP-4-05-013 SCT	0.02%

La emulsión, que se considera de viscosidad media, se debe aplicar en temperaturas máximas de 30°C o mínimas de 5°C para su correcto desempeño.

3.12 MICRODEVAL

La prueba Microdeval, funciona como una prueba de desgaste, consiste en colocar agregado grueso con un peso de 1500 gr en una maquina especialmente para la prueba. Dado que se obtiene un tamaño nominal de 3/8" de pulgada la normativa indica que se deben tener las proporciones como indica la Tabla 5. El procedimiento se muestra en la Figura 11

Tabla 5. Granulometría para microdeval. Fuente: Elaboración propia a partir de (ASTM, 2017)

<u>PASA</u>	<u>RETIENE</u>	<u>MASA</u>
12.5mm (1/2")	9.5mm (3/8")	750g
9.5 mm (3/8")	6.3mm (1/4")	375g
<u>6.3 mm (1/4")</u>	<u>4.75mm (#4)</u>	<u>375g</u>

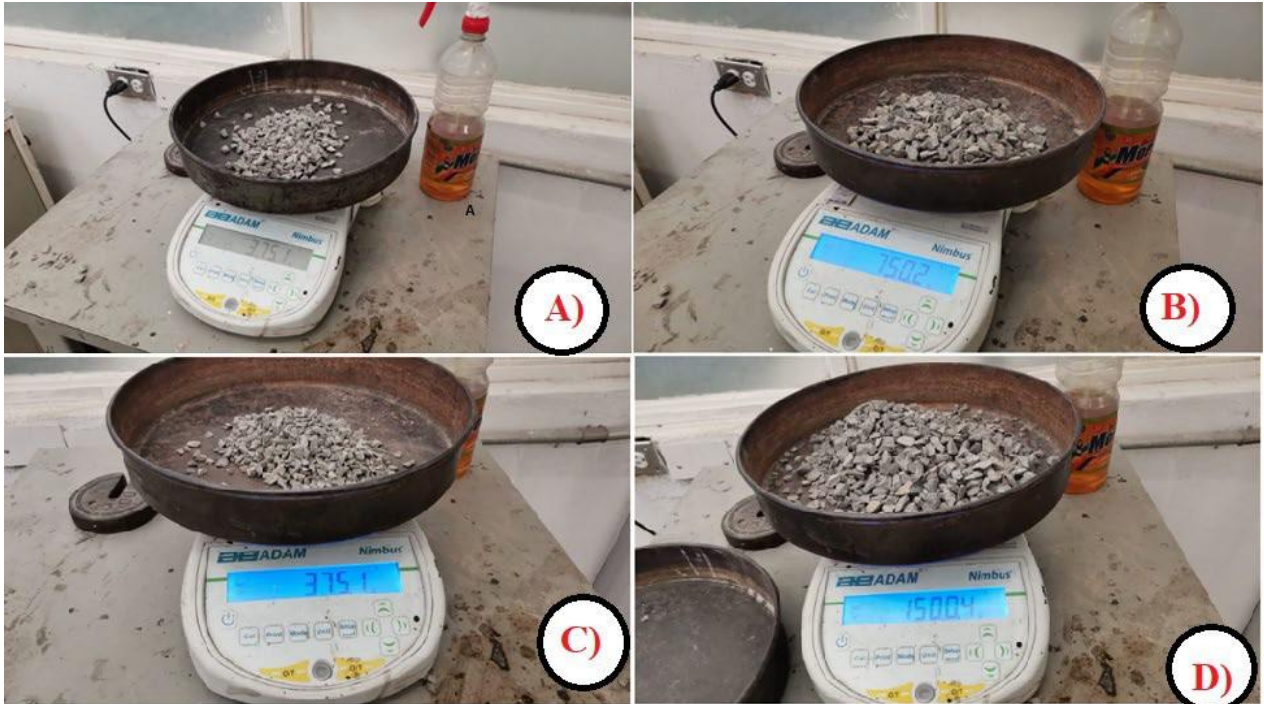


Figura 11. Peso de material microdeval $\frac{1}{4}$ " A) Peso de material $\frac{3}{8}$ " B), Peso de material #4 C), Peso de material $\frac{3}{8}$ ", $\frac{1}{4}$ ", #4 combinados D). Fuente: Propia

Se colocaron 5 kg de balines de acero junto con la muestra de agregado pétreo, se sometió a la máquina de los microdeval por 2 horas a 100 revoluciones por minuto. Posteriormente, se procede a lavar el material que retiene la malla #4 hasta que todo el polvo residual se quite del agregado, retirando también los balines de acero con un imán Figura 12.



Figura 12. Cinco kilogramos de balines de acero. Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Formula (2) el peso final del material ya limpio es de 1217.9 g, desgastándose 282.1 g. Teniendo la fórmula 1 para el análisis como resultado tenemos que:

$$\text{Desgaste Micro} - \text{Deval}(\%) = \left(\frac{A-B}{A} \right) * 100 \quad (1)$$

$$\text{Desgaste Micro} - \text{Deval}(\%) = \left(\frac{1500-1217.9}{1500} \right) * 100 = 18.8\% \quad (2)$$

A=Peso Inicial

B=Peso Final

El desgaste microdeval da un 18.8%, redondeándose a 19 %, lo cual cumple con estándares para creación de carpeta asfáltica. En este caso como la normativa ISSA TB A 105 no especifica los valores calidad que debe cumplir el agregado pétreo por medio esta prueba se considera un resultado favorable, cabe destacar que el desgaste de los Ángeles dio un 21.9% un valor muy similar a esta prueba.

3.13 EQUIVALENTE DE ARENA

La prueba equivalente de arena sirve para saber qué porcentaje de los agregados pétreos finos, puede llegar a ser arcilla o arena. Primero, se realizó un cuarteo para tener un espécimen de muestra más representativo como se muestra en la Figura 13.



Figura 13. Cuarteo equivalente de arena. Fuente: Elaboración propia

Antes de trabajar con el material se tiene que preparar una solución de trabajo con glicerina y agua, se deben añadir 85cm³ de glicerina en un galón de agua destilada. Como se muestra en las Figuras 14 y 15.

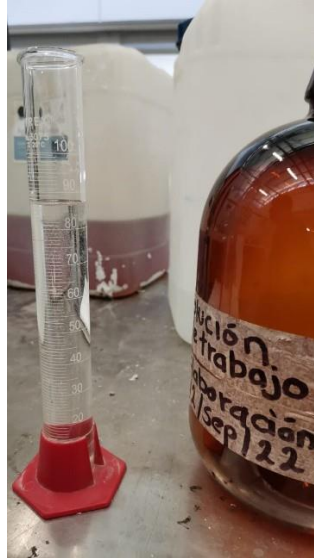


Figura 14. 85cm³ de solución para preparar solución de trabajo. Fuente: Elaboración propia

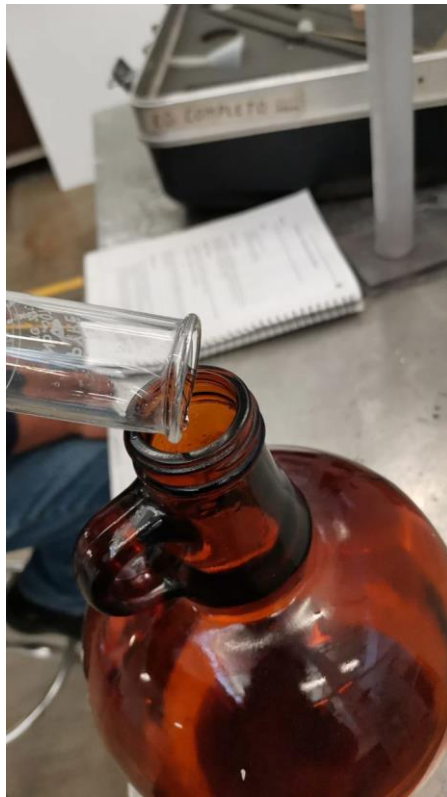


Figura 15. Realización de solución de trabajo. Fuente: Elaboración propia

Del cuarteo de agregado fino se obtuvo una muestra de 80cm³ de material el cual se va a tratar con el procedimiento. En el laboratorio se tiene un recipiente con el volumen preciso de normativa según la M-MMP-4-04-004/02.



Figura 16. 80cm³ de muestra agregado pétreo fino. Fuente: Elaboración propia

Se tiene que colocar 4 pulgadas de la solución de trabajo como se muestra en la Figura 17 con la que se va a agitar el material pétreo el cual se vacía en el recipiente junto con la solución de trabajo como se observa en la Figura 18, se deja reposar por 10 minutos como en la Figura 19 para posteriormente mezclarse por 30 segundos a una velocidad de 175 a 180 ciclos por minuto con una extensión de carrera de 200 ± 3 mm aparece en la Figura 20.



Figura 17. Solución 4". Fuente: Elaboración propia



Figura 18. Tiempo en cero. Fuente: Elaboración propia



Figura 19. Tiempo de reposo 10 minutos. Fuente: Elaboración propia



Figura 20. Temporizador 30 segundos. Fuente: Elaboración propia

La muestra, reposada por 10 minutos, se coloca en la máquina de agitación por 30 minutos se puede observar en la Figura 21 y 22 donde se aprecia ya colocada la probeta.



Figura 21 Colocación de muestra. Fuente: Elaboración propia



Figura. 22 Agitado equivalente de arena. Fuente: Elaboración propia

Al terminar el proceso de agitación, se procede a vaciar la solución de trabajo previamente preparada con un tubo irrigador, evitando movimientos bruscos para que la arena y las partículas de arcilla se suspendan en la solución. Posteriormente, se debe dejar reposar por 20 minutos se puede observar.

en la Figura 23, cumpliendo el tiempo que se establece en la normativa. Al observar detenidamente se puede que el nivel de arcillas es de 6 como se presenta en la Figura. 24 lo cual es una característica deseada. Las arenas llegaron a una altura de 14.6 pulgadas como se muestra en la Figura 25, a las cuales se les debe restar 10 pulgadas que corresponden a la altura del medidor, teniendo como resultado 4.6pulgadas, lo cual es un resultado esperado.



Figura 23. Tiempo de reposo 20 minutos. Fuente: Elaboración propia



Figura 24. No se observan arcillas. Fuente: Elaboración propia.

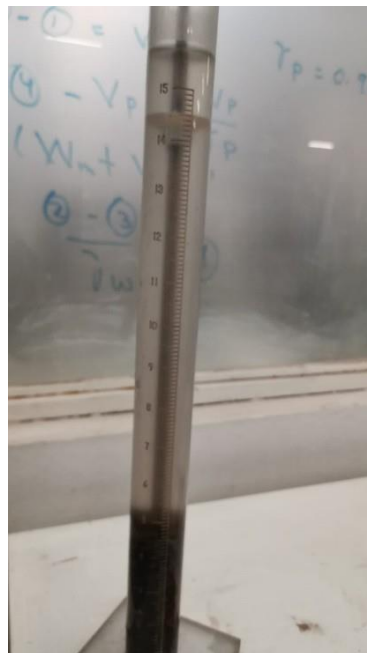


Figura 25. Altura de arena.14.6-10. Fuente: Elaboración propia

En base a la fórmula de equivalente de arena se procede a realizar el cálculo, se muestran en las fórmulas 3 y 4.

$$\%EA = \left(\frac{LNS_{Arena}}{LNS_{Finos}} \right) * 100 \quad (3)$$

$$\%EA = \left(\frac{4.6}{6} \right) * 100 \quad (4)$$

LNS_{arena} = Medida en la probeta de arena

LNS_{finos} = Medida en la probeta de finos

EA= Equivalente de arena

Dando como resultado 76.66%

3.1.4 DESGASTE DE LOS ÁNGELES

La prueba de desgaste de los Ángeles es un método para evaluar el material pétreo, similar al microdeval, pero se distingue porque utiliza esferas de acero de mayor diámetro. Consiste en colocar una muestra del material en un cilindro giratorio donde por medio de impactos de las esferas de acero el material pétreo se desgasta.

Para este caso se tomó una muestra de material previamente cuarteada de 4610 g como se muestra en la Figura 26 teniendo las proporciones como se muestran en la Tabla 6 para posteriormente colocarse en la máquina de los Ángeles, la cual consta de un cilindro giratorio, al que también se le agregan 11 esferas de acero con una masa aproximada de 390 y 445 g cada una. Se programa la máquina para que tenga una velocidad de 30 a 33 revoluciones por minuto, con un total de 500 revoluciones.

El material, ya sometido a la prueba de desgaste se muestra en la Figura. 27, donde se observa el material fino producto de la abrasión de las esferas de acero.



Figura 27. Peso inicial. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Composición de la muestra. Fuente: Elaboración propia a partir de SCT, 2002

Tipo de composición de la muestra de prueba	Rango de tamaños		Masa de la fracción g	Capa abrasiva	
	mm	Designación		Número de esferas	Masa total g
A	37.5-25	1 1/2"- 1"	1250+-25	12	5000+-25
	25-19	1"-3/4"	1250+-25		
	19-12.5	3/4"-1/2"	1250+-10		
	12.5-9.5	1/2"-3/8"	1250+-10		
	Masa total de la muestra de prueba		1250+-10		
B	19-12.5	3/4"-1/2"	1250+-10	11	4584+-25
	12.5-9.5	1/2"-3/8"	1250+-10		
	Masa total de la muestra de prueba		1250+-10		
C	9.5-6.3	3/8"-1/4"	1250+-10	8	3330+-20
	6.3-4.75	1/4"-N4	1250+-10		
Masa total de la muestra de prueba		1250+-10	6	2500+-15	
D	4.75-2	N4-N10			1250+-10



Figura 28. Después de pasar por máquina de los Ángeles. Fuente: Elaboración propia

Posteriormente, el material se pesó para descartar pérdidas el cual fue 4520 g, como se observa en la Figura 29 teniendo una pérdida de 90 g que podría considerarse despreciable. Este material se criba por la malla #12, desechando el material que pasa dicha malla, del material que retiene se obtiene 3600 g, como se observa en la Figura30.



Figura 29. Agregado pétreo desgastado por máquina de los Ángeles. Fuente: Elaboración propia



Figura 30. Peso retiene la malla #12". Fuente: Elaboración propia.

Al usar la fórmula de desgaste de Los Ángeles queda como resultado como se muestra en las fórmulas 5 y 6 :

$$Pa = \left(\frac{P_i - P_f}{P_i} \right) * 100 \quad (5)$$

$$Pa = \left(\frac{4610 - 3600}{4610} \right) * 100 \quad (6)$$

Pa=21.9%

3.1.5 ANALISIS GRANULOMÉTRICO

La granulometría sirve para medir el tamaño de las partículas que se tiene en el agregado pétreo y el porcentaje de cada uno de esos tamaños.

Primeramente, se realizó un cuarteo como se observa en la Figura 31 para tener una muestra representativa del material. Los resultados se observan resumidos en la Tabla 7; los pesos de las muestras se observan en las Figuras 32 y 33.



Figura 31 Cuarteo. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Granulometría. Fuente: Elaboración propia

Malla	Retiene (g)	Pasa (g)	Pasa (%)	Retiene (%)
2"	0	2000	100.00	0
1 1/2"	0	2000	100.00	0
1 1/4"	0	2000	100.00	0
1"	0	2000	100.00	0
3/4"	22.9	1977.1	99.00	1
1/2"	115.7	1861.4	93.00	6
3/8"	633.8	1227.6	61.00	32
1/4"	664.7	562.9	28.00	33
#4	456.4	106.5	5.00	23
#6	88.1	18.4	1.00	4
#8	3.4	15	1.00	0
#10	14.8	0.2	0.00	1



Figura 32 Muestra total A), Retiene malla ¾".B), Retiene malla ½" C), Retiene malla 3/8" D), Retiene malla ¼".E), Retiene malla #4 F), Retiene malla #6 G). Fuente: Elaboración propia



Figura 33 Retiene malla #8. Fuente: Elaboración propia

3.1.6 SOLIDEZ DE AGREGADOS POR MEDIO DE SULFATO DE MAGNESIO

La solidez de agregados de es una prueba de desgaste, que evalúa que tan sólido es el agregado pétreo, sometiéndolo a una solución en este caso de sulfato de magnesio, por algún tiempo determinado; se pesa y se observa cómo va evolucionando el agregado pétreo.

Según la Tabla 8, se obtiene una muestra de retiene malla $\frac{1}{2}$ " de 500g, como se muestra en Figura 34, retiene malla #4 de 300g, ya que no se tienen tamaños más grandes.

Tabla 8 Tamaño de agregado solidez de agregado pétreo. Fuente: Elaboración propia a partir de (SCT 2003)

Tamaño del material (t)		Masa de muestra Mi g
De (Pasa la malla)	A: (Se retiene en la malla)	
2" (50mm)	1 1/2" (37.5mm)	1500
1 1/2" (37.5mm)	1" (25mm)	1500
1" (25mm)	3/4" (19mm)	1000
3/4" (19mm)	1/2" (12.5mm)	500
1/2" (12.5mm)	N 4 (4.76mm)	300



Figura 34 500gr retiene malla 1/2". Fuente: Elaboración propia

Se tienen que colocar 350 g de sulfato de magnesio como se muestra en la Figura 35 en un litro de agua para después sumergirse los 800g de material pétreo en esto se observa en Figura 36



Figura 35. 350g de sulfato de magnesio en un litro de agua. Fuente: Elaboración propia

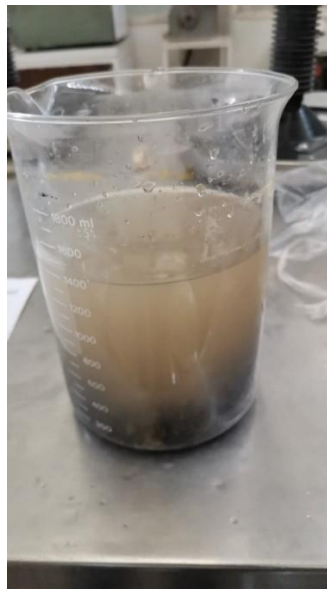


Figura 36. Sumergida intemperismo acelerado 500gr retiene ½” + 300g pasa #4. Fuente: Elaboración propia

El peso de la charola es 885.9g, sola sin material, el material expuesto se retira de la solución Figura 37 y se pone a secar para retirar toda el agua posible, después se lava y se seca de nuevo para pesarse, teniendo un peso final de 700g



Figura 38. Peso de charola sin material. Fuente: Elaboración propia



Figura 37. Después de intemperismo con sulfuro de magnesio. Fuente: Elaboración propia



Figura 39. Material secándose en estufa para pesarse. Fuente: Elaboración propia



Figura 40. Agregado seco segundo día con peso de charola. Fuente: Elaboración propia

Resolviendo la formula del procedimiento según la normativa M-MMP-4-04-008/03 el resultado queda de la siguiente manera ecuación 7 y 8.

$$P(t) = \left(\frac{M_i - M_f}{M_T} \right) * 100 \quad (7)$$

$$P(t) = \left(\frac{800 - 700}{800} \right) * 100 \quad (8)$$

$$= 12.5\%$$

3.1.7 CONTENIDO DE ASFALTO

La emulsión asfáltica es una mezcla de agua, cemento asfáltico y un material emulsificante, en algunas ocasiones también se agrega un polímero para lograr que su rompimiento sea controlado o que tenga propiedades específicas deseadas.

El agua se evapora a menor temperatura que el cemento asfáltico por lo que el calor es una manera correcta de saber qué porcentaje de asfalto se tiene en la emulsión.

Se pesó la flanera sola registrando un peso de 124.6 g, como se puede observar en la Figura 41.



Figura 41. Peso flanera sin cemento asfáltico. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente se colocaron 100g de emulsión asfáltica como se muestra en la Figura 42 en el recipiente con peso 124.6 g obsérvase en la Figura 3.1.7.3 y se procedió a calentar la muestra a una temperatura de 160°C por 2 horas continuas como se observa en la Figura 3.1.7.3.



Figura 42. Peso solo de emulsión. Fuente: Elaboración propia

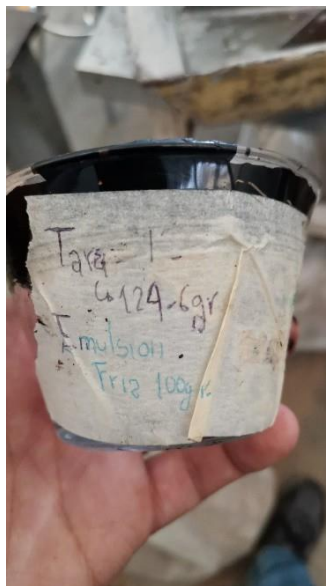


Figura 43. Peso flanera y emulsión. Fuente: Elaboración propia



Figura 44 Tiempo de secado en horno emulsión. Fuente: Propia

Al terminar el proceso se obtuvo un peso final de 194.4 g como se muestra en la Figura 45 los cuales se le restó el peso de la tara, comparándolos con el peso de la emulsión total, teniendo como resultado.



Figura 45. Peso final de cemento asfáltico. Fuente: Elaboración propia

$$194.4 - 124.6 \text{ g} = 69.8 \text{ g} \quad (10)$$

Se evaporó el 30.2% respecto al peso total de la emulsión asfáltica, resultando un contenido de asfalto de 69.8%, aunque esto no coincide exactamente con lo indicado por el fabricante, se acerca significativamente, esto es de esperarse ya que los fabricantes de emulsión asfáltica normalmente colocan una cantidad superior de asfalto a las emulsiones para lograr un mejor desempeño.

3.1.8 PARTICULAS DE PET

Se utilizó una mezcla PETE (PET reciclado) y PET las botellas utilizadas contienen un 30% de PETE y un 70% de PET virgen, se seleccionaron 75 g de material transparente y limpio, el cual fue cortado para en tiras de aproximadamente 2 pulgadas de ancho con 6 pulgadas de largo para facilitar su manejo, posteriormente se cortaron en secciones de cuadrados de 2x2 pulgadas.

Licué durante un minuto en un litro de agua en una licuadora de 350 watts a su máxima potencia.

El material se cribó usando las mallas ¼", 3/8", #4, #6, #8, #10 y 200. Los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Granulometría de PET. Fuente: Elaboración propia

Malla	Retenido (g)	Tara(g)	Pasa (g)
1/4"	30.4	2.8	27.6
3/8"	36.4	2.8	33.6
#4	8.8	2.8	6
#6	7.1	2.8	4.3
#8	4	2.8	1.2
#10	3.8	2.8	1
200	3	2.8	0.2
	Total		73.9



Figura 46. Cribado de PET. Fuente: Elaboración propia

Se opta por hojuelas de PET con tamaño nominal de 3/8 de pulgada porque es el material que se obtuvo en mayor cantidad al hacer la molienda y la granulometría, además se realizó una muestra con tamaños más finos y se le realizó una prueba de círculo de arena que dio como resultado una microtextura, ya que los agregados finos ocupan los intersticios con mayor facilidad que las hojuelas con tamaño nominal de 3/8 de pulgada.

Posteriormente las hojuelas de PET se sometieron a un aumento de temperatura de 120° C para quitarles la humedad que tuvieran presente.

3.3 MUESTRAS DE MEZCLAS CON DIFERENTES PROPORCIONES DE PET

Las muestras que se realizan tienen características similares, componiéndose de grava de tamaño nominal de 3/8”, se realizaron pruebas con un porcentaje de emulsión asfáltica de 6% que es lo que se usa convencionalmente para riegos de sello o microaglomerados se observó una muestra visiblemente más pobre de asfalto, modificando el porcentaje de la misma a un porcentaje de emulsión asfáltica de 14% en comparación con el peso de la grava, se obtuvieron resultados más favorables a simple vista, sin hacer alguna prueba de desgaste o adherencia, optándose por usar esta cantidad para todas las pruebas, variando en este sentido solamente es el porcentaje de PET respecto al volumen de la mezcla de grava y emulsión asfáltica.

Se realizó un análisis de contenido de asfalto a emulsión posterior, ya que un porcentaje de 14% de emulsión asfáltica es muy alto en comparación con lo que comúnmente se usa en campo, en la Figura 47 se pesan 100 g de emulsión asfáltica excluyendo ya el peso de la flanera.

Figura 47. Peso de la emulsión asfáltica antes del proceso de evaporación de agua. Fuente:
Elaboración propia.



Posteriormente, la emulsión asfáltica se sometió a una temperatura de 180°C durante una hora, acelerando su rompimiento y al hacerlo, el agua separada se evaporaría dejando solamente el asfalto así conociendo su contenido.

Al enfriarse, quedó como era de esperarse, solamente asfalto; pasando de una mezcla líquida a sólida como se muestra en la Figura 48.



Figura 48. Asfalto sin agua ni emulsificante. Fuente: Elaboración propia.

El peso total del asfalto con la flanera fue de 189.3g por lo tanto, restándole el peso de la flanera que es de 129.9 g, da como resultado 60% de asfalto, perdiendo un 8% del asfalto inicial de que contenía la emulsión al inicio de las pruebas. Teniendo que hacer un ajuste, siendo que ya no es un 14% de emulsión asfáltica, sino uno 11% siendo un número recurrente en el diseño de mezclas.

3.2.1. DISEÑO DE LA MUESTRA A-0% (SIN PET)

Para la primera prueba se usaron 785.8 g de grava de tamaño nominal 3/8" como, se muestra en la Figura 3.2.1.1 quitando ya el peso de la charola de acero y el recubrimiento plástico que se le colocó.



Figura 49 Material pétreo para primera muestra. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que se usa 14% de emulsión asfáltica para la muestra se colocaron 109.5 g de emulsión asfáltica como se muestra en la Figura 50.



Figura 50. Contenido de emulsión asfáltica prueba A. Fuente: Elaboración propia.

La prueba, al romper la emulsión en 1 hora, queda como se muestra en la Figura 51 con una adhesión entre las partículas vistas a simple vista y sin alguna prueba de desgaste mejor que cuando se diseñó la 6% de emulsión asfáltica con respecto al agregado.



Figura 51 Prueba A. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. DETERMINACIÓN DE PORCENTAJES DE PET RESPECTO AL VOLUMEN DE LA MUESTRA.

Se propone variar los porcentajes de PET, comenzando con un 5% respecto al volumen de la mezcla aumentando, 2.5% hasta llegar a un porcentaje final del 10%. Utilizando un vernier se obtuvo el volumen de la primera muestra teniendo como base la misma para las siguientes, se observa en la Tabla 10.

Teniendo un volumen de 133.433cm^3 de la pastilla

Tabla 10 Volumen de muestras. Fuente: Elaboración propia

%PET	Volumen (cm ³)
2.5	6.67
5	13.3433
7.5	20.0149
10	26.6866

Por consiguiente el número de botellas que se necesitan para la elaboración de cada pastilla se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Cantidad de botellas usadas por muestra. Fuente: Propia

Peso de botella de agua con capacidad de 1L (g)	Densidad de PETE(g/cm ³)	Prueba	Porcentaje de PETE (%)	Volumen usado (cm ³)	Peso (g)	Número de botellas por pastilla
20.9	1.41	A	0	0	0	0
		B	2.5	6.67	9.40	0.91
		C	5	13.34	18.81	1.83
		D	7.5	20.01	28.22	2.74
		E	10	26.69	37.63	3.66

En este mismo sentido el cálculo para saber cuántas botellas de PETE y PET se necesitan para construir un metro cuadrado de tratamiento superficial se obtuvo mediante el área conocida de la pastilla 0.0182m² y el número de botellas necesarias para elaborar cada pastilla, haciendo una regla de tres, con los resultados que se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Cantidad de botellas por requeridas por m² de tratamiento. Fuente: Propia

Prueba	Porcentaje de PETE (%)	Volumen usado (cm ³)	Peso (g)	Número de botellas por pastilla	Diámetro de base (cm)	Numero de botellas por m ²
A	0	0	0	0		
B	2.5	6.67	9.40	0.91	15.24	50.1961406
C	5	13.34	18.81	1.83	15.24	100.417116
D	7.5	20.01	28.22	2.74	15.24	150.625298
E	10	26.69	37.63	3.66	15.24	200.834232

3.2.3. DISEÑO DE PRUEBAS CON PORCENTAJE DE PET

Para el diseño de la prueba B se utilizaron 6.67 cm^3 de PET midiéndose con una probeta de 100ml colocando 80ml como se muestra en la Figura 52 de agua potable la cual al agregarle el PET subiría su nivel observándose en la Figura 53.



Figura 52. Medida inicial de probeta B-2.5% sin PET. Fuente: Elaboración propia.



Figura 53 Medida de 6.67ml de PET. Fuente: Elaboración propia.

En la primera prueba se observó que eran necesarios aproximadamente 500 g de agregado pétreo para hacer la pastilla, ya que era la cantidad que cubría de mejor manera el volumen. Por esa razón se utilizó esa cantidad para las demás pruebas como se muestra en la Figura 54.



Figura 54 Cantidad de agregado pétreo prueba B. Fuente: Elaboración propia.

Consecuentemente se usaron 70.9 g de emulsión asfáltica para lograr el 14% con respecto al peso del agregado como se muestra en la Figura 55.



Figura 55. Emulsión en la mezcla. Fuente: Elaboración propia.

3.2.7 CÍRCULO DE ARENA

Esta evaluación posibilita cuantificar y documentar la profundidad promedio de las depresiones que el material agregado crea en la superficie de un pavimento. A partir de esta información, se puede estimar la profundidad promedio de la textura en relieve de la superficie del pavimento como se muestra en la Figura 56.



Figura 56. Medición de macrotextura. Fuente: Elaboración propia

Para medir la macrotextura se emplea la siguiente ecuación (11)

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (11)$$

Siendo

MDT = Profundidad media de la macrotextura en mm

V = Volumen de la muestra en mm^3

D =Media del diámetro del área cubierta por el material

Teniendo los resultados que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Resultados de volumen de las muestras. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Volumen(mm ³)
A-0%	110000
B-2.5%	120000
C-5%	120000
D-7.5%	120000
E-10%	120000

El diámetro del área cubierta por el material es 165.07mm en cada uno de los casos dando como resultado Tabla 14.

Tabla 14. Macrotextura de las muestras sin ensayar. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	% de PET	Macrotextura en (mm)
A	0%	5.02
B	2.5%	5.47
C	5%	5.47
D	7.5%	5.47
E	10%	5.47

3.3 PRUEBAS DE DESGASTE

La superficie del pavimento tiende a sufrir alteraciones por el clima y el paso de los vehículos principalmente; los agregados tienden a desprenderse, generando consecuentemente un pulimento. Asimismo, existe una normativa para los slurrys; al ser un tratamiento superficial y no estructural, se consideró dicha normativa para medir el desgaste de las muestras adaptándose a los equipos que existen en el laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Las muestras con diferentes porcentajes de PET y sus pesos se observan en la Figura 57.

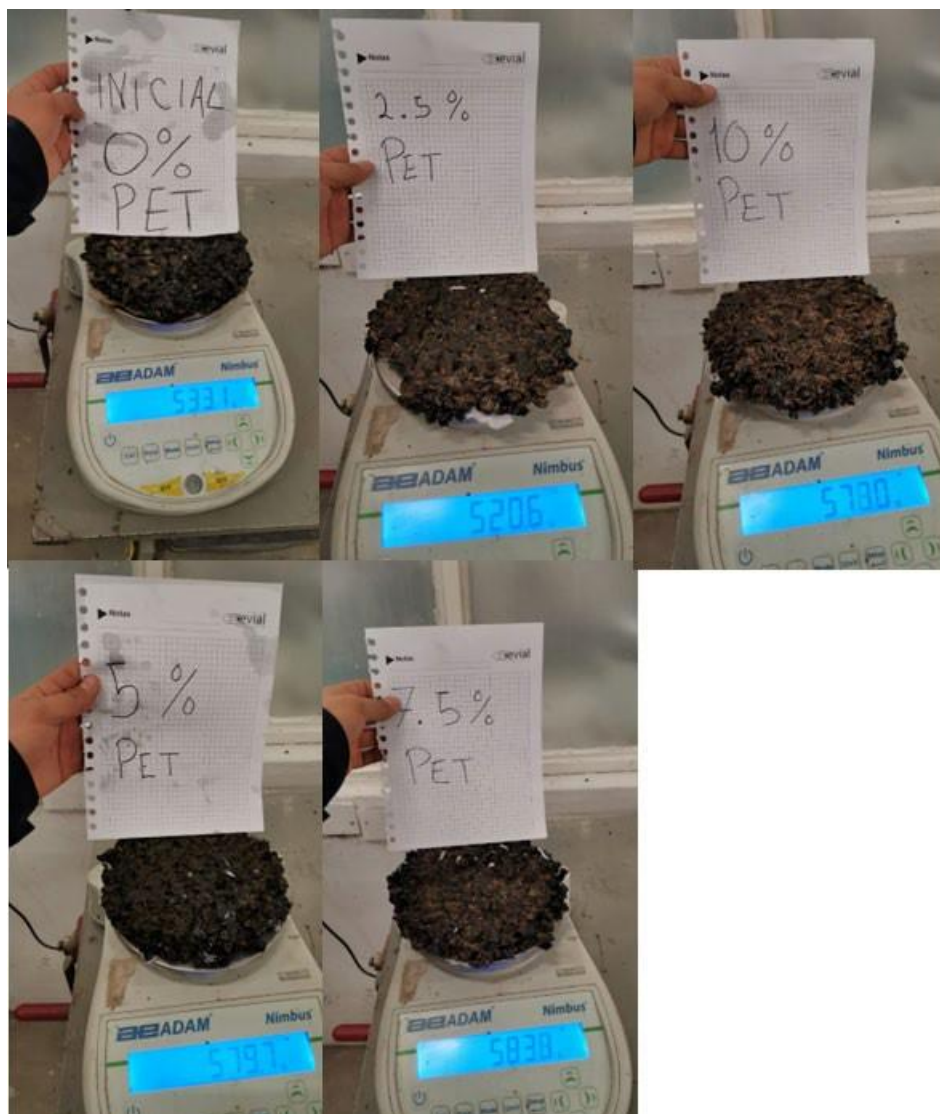


Figura 57. Pesos de muestras secas. Fuente: Elaboración propia

Las muestras se dejaron en remojo 6 días cambiando el agua continuamente para evitar su contaminación como se observa en la Figura 58.

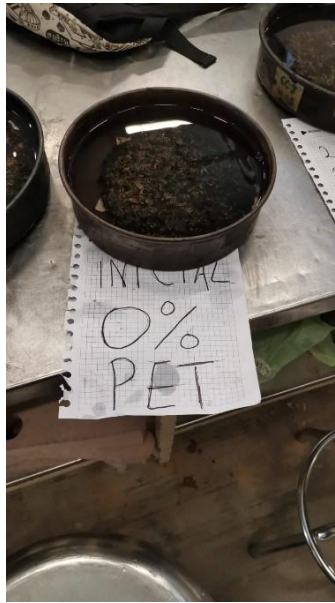


Figura 58 Muestra en remojo. Fuente: Elaboración propia

Las muestras se sometieron a una maquina batidora Hobart N-50 como se muestra en la Figura 3.3.3 la cual se accionó en el modo de revoluciones bajas por 315+2 segundos como lo especifica la normativa ISSA TB 100 en la Tabla 15.

Tabla 15. Duración del ensayo. Fuente: Elaboración propia

FACTORES DE CORRECIÓN DE PÉRDIDAS PARA LA CORRELACIÓN CON C-100			
Modelo Hobart	Duración equivalente del ensayo	Multiplique la pérdida de gramos por el factor adecuado para obtener la pérdida por área unitaria	
	Segundos	g/ft ²	g/m ²
C-100	300+2	3.06x1.0	32.9x1.0
A-120	405+2	2.78x1.17	29.9x1.17
N-50	315+2	3.48x0.78	37.5x0.78
N-50 Modificada	315+2	3.06x1.0	32.9x1.0



Figura 59. Maquina batidora Hobart N-50. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras ensayadas húmedas se pesaron y dieron como resultado como se muestra en la Figura 60

COSTOS APROXIMADOS POR METRO CUADRADO

Preparación de la superficie:

Limpieza y barrido: \$15m²

Materiales:

Emulsión asfáltica: \$45m²

Agregados: \$35m²

Aditivos (si son necesarios): \$15m²

Aplicación y compactación:

Mano de obra: \$65m²

Equipos y maquinaria: \$30m²

Costos adicionales:

Transporte de materiales: \$15m²

Costo total estimado: \$220

Sumando estos componentes, el costo total por metro cuadrado para un microaglomerado en la zona del centro de México sería de aproximadamente \$220m².

Detalle de costos aproximados:

Preparación de la superficie: \$15

Materiales (emulsión, agregados): \$95

Aplicación y compactación (mano de obra y equipos): \$95

Costos adicionales (transporte): \$15

Al agregársele PET el costo aumenta ligeramente sumándosele a ese precio de \$220 por metro cuadrado el costo del porcentaje de polímero en cada caso. En el caso de Querétaro la tonelada de PET reciclado y cortado ronda entre los 8 mil y 12 mil pesos, esto obtenido preguntando en diferentes establecimientos de reciclaje en la zona metropolitana.

Por lo tanto, la siguiente Tabla 16 indica los precios por metro cuadrado de cada una de las combinaciones usadas en esta investigación.

Tabla 16. Costos por m² de superficie de rodamiento con PET. Fuente: Propia

Porcentaje de PETE (%)	Cantidad de PETE por m ² (Ton)	Costo promedio de PET por tonelada	Consto en pesos mexicanos	Costo promedio de microaglomerado (\$)	Total
0	0	0	0	220	220
2.5	0.0010	10000	10.49	220	230.4909934
5	0.0021	10000	20.99	220	240.9871772
7.5	0.0031	10000	31.48	220	251.4806872
10	0.0042	10000	41.97	220	261.9743544

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la prueba de desgaste de los Ángeles el agregado se comportó de una manera esperada, ya que, por su color y características visuales, se deduce que es un agregado pétreo de origen basáltico, los cuales tienen gran resistencia al desgaste. En esta prueba se requiere que el material obtenga como máximo un desgaste de 35% y se obtuvo un desgaste de 21.90%.

Para corroborar dichos resultados se sometió otra muestra del mismo material a desgaste microdeval, la normativa ISSA no pide esta prueba en sus especificaciones, pero sirve mucho para comparar resultados con la prueba de desgaste de los Ángeles, el desgaste microdeval arrojó un resultado de 18.8% el cual es muy similar a 21.90% de desgaste de los Ángeles por lo cual se deduce que ambos son correctos.

La prueba de equivalente de arena muestra que porcentaje del material fino corresponde a arenas, el material pétreo con el que se trabajó tiene un tamaño nominal de 3/8" y está lavado, por lo cual se esperaba que tuviera un bajo porcentaje de arcillas y limos, por eso mismo el resultado de equivalente de arena fue de 76.66% que es un porcentaje alto, aceptable de arena, ya que la normativa ISSA establece como mínimo 45%.

En intemperismo acelerado el material se comportó de manera esperada, ya que es un material de origen volcánico, tiende a tener una alta resistencia a las sales minerales, que en este caso fue el sulfato de magnesio el resultado fue 12,5% y la normativa ISSA establece como máximo un 25% lo cual refleja que es un agregado pétreo idóneo para superficies de rodamiento.

El agregado pétreo de banco cumplió con la caracterización que pide la normativa ISSA, puede usarse para slurry y micropavimentos en Tabla 17 se observa los resultados obtenidos de dicho material comparándose con los resultados que esperan de este.

Tabla 17. Resultados de caracterización de material pétreo. Fuente: Propia

Ensayo	Especificación	Resultado de material
Equivalente de arena, suelos y agregados finos	45 mínimo	76.66%
Solidez de agregados por medio de sulfato de sodio o sulfato de magnesio	15% máximo c/Na ₂ SO ₄ 25% máximo c/MgSO ₄	12.5% (sulfato de magnesio)
Resistencia a la degradación de agregado grueso de pequeño tamaño por abrasión e impacto en la máquina de los Ángeles.	35% máximo	21.90%

Por otro lado, la emulsión asfáltica que se usó es una ECR 65 la cual indica que es rompimiento rápido y con un contenido de asfalto de 65% respecto al volumen total de la emulsión. Al realizarle la prueba de contenido de asfalto recién llegada al laboratorio, se obtuvo un 69.8% de asfalto, lo cual era de esperarse ya que las empresas que suministran emulsión asfáltica, en especial la de rompimiento rápido, tienden a poner un porcentaje mayor de contenido asfáltico porque al manipularla y transportarla tiende a comenzar a romper y es mejor en la mayoría de los casos tener porcentaje mayor del que se pidió, que menor.

Al ser de rompimiento rápido se observó que las muestras tenían un comportamiento como si tuviera un porcentaje menor de asfalto, esto reflejado en menos cohesión de las partículas de agregado pétreo con la emulsión, al romper se tenía menos cantidad de asfalto y tenía una consistencia más líquida, por lo que se procedió a realizar de nuevo una prueba de contenido de asfalto obteniéndose como era de esperarse un contenido de asfalto menor, 59.4% un 10.4% menos que al inicio, para esto se procedió a hacer modificaciones en la mezcla.

Tras la obtención de las muestras ensayadas en la batidora Hobart se obtuvieron los siguientes resultados se observan en las Tablas 18,19,20, 21,22,23,24,25,26,27,28 y 29 en los cuales los resultados que se toman en cuenta son los secos, ya que no debe tomarse en cuenta el peso del agua,

En las Figuras 60 y 61, se observan que los resultados favorecen a las pruebas 2 y 3, ya que se tuvo una pérdida de macrotextura promedio a la prueba 1, sin embargo la pérdida de agregados es muy similar en la prueba 1 y 3 siendo la pastilla D la que mayor pérdida de agregado tuvo, en el caso de la prueba 2 que fue la pastilla C la que mayor pérdida de agregado tuvo, siendo contrario a las pruebas 1 y dos que fue donde menos agregado se perdió.

Tabla 18. Pesos antes de desgaste prueba 1. Fuente: Propia

Pesos antes de prueba destructiva		
Prueba	Porcentaje PET (%)	Pastilla (g)
A	0	533.1
B	2.5	520.6
C	5	579.7
D	7.5	583.1
E	10	577

Tabla 19. Pesos Después del desgaste prueba 1. Fuente: Propia

Prueba	Porcentaje PET (%)	Pesos después de prueba destructiva	
		Húmeda Pastilla (g)	Seca Pastilla (g)
A	0	501.1	481.6
B	2.5	525.3	480.8
C	5	584	546.9
D	7.5	505	478.2
E	10	565.5	529.4

Tabla 20. Circulo de arena antes de prueba destructiva prueba 1. Fuente: Propia

Prueba	Porcentaje PET (%)	Circulo de arena antes de prueba destructiva	
		cm ³	mm ³
A	0	110	110000
B	2.5	120	120000
C	5	120	120000
D	7.5	120	120000
E	10	120	120000

Tabla 21. círculo de arena después de prueba destructiva. Fuente: propia

Prueba	Porcentaje PET (%)	Círculo de arena después de prueba destructiva	
		cm ³	mm ³
A	0	94	94000
B	2.5	95	95000
C	5	76	76000
D	7.5	80	80000
E	10	90	90000

Tabla 22. Pesos antes de prueba destructiva prueba 2. Fuente: Propia

Pesos antes de prueba destructiva		
Prueba	Porcentaje PET (%)	Pastilla (g)
A	0	578
B	2.5	583
C	5	638
D	7.5	634
E	10	597

Tabla 23. Pesos después de la prueba destructiva. Fuente: Propia

Pesos después de prueba destructiva			
Prueba	Porcentaje PET (%)	Húmeda	Seca
		Pastilla (g)	Pastilla (g)
A	0	577	554
B	2.5	560	533
C	5	551	535
D	7.5	608	588
E	10	566	530

Tabla 24. Circulo de arena antes de la prueba destructiva prueba 2. Fuente: Propia

Circulo de arena antes de prueba destructiva			
Prueba	Porcentaje PET (%)	cm ³	mm ³
A	0	78	78000
B	2.5	115	115000
C	5	117	117000
D	7.5	130	130000
E	10	140	140000

Tabla 25. Círculo de arena después de prueba destructiva. Fuente: Propia

Círculo de arena después de prueba destructiva			
	Porcentaje PET (%)	cm ³	mm ³
A	0	50	50000
B	2.5	90	90000
C	5	85	85000
D	7.5	100	100000
E	10	110	110000

Tabla 26. Pesos antes de pruebas destructivas prueba 3. Fuente: Propia

Pesos antes de prueba destructiva	
Porcentaje PET (%)	Pastilla (g)
0	530
2.5	592
5	576
7.5	609.8
10	637

Tabla 27. pesos después de pruebas destructivas prueba 3. Fuente: Propia

Después de prueba destructiva			
		Húmeda	Seca
Prueba	Porcentaje PET (%)	Pastilla (g)	Pastilla (g)
A	0	554	502
B	2.5	616	556
C	5	595	560
D	7.5	667	497
E	10	672	620

Tabla 28. Círculo de arena antes de prueba destructiva prueba 3. Fuente: Propia

Círculo de arena antes de prueba destructiva			
Prueba	Porcentaje PET (%)	cm ³	mm ³
A	0	90	90000
B	2.5	112	112000
C	5	104	104000
D	7.5	113	113000
E	10	117	117000

Tabla 29. Círculo de arena después de prueba destructiva prueba 3. Fuente: Propia

Después de prueba destructiva			
	Porcentaje PET (%)	cm ³	mm ³
A	0	75	75000
B	2.5	90	90000
C	5	80	80000
D	7.5	82	82000
E	10	90	90000

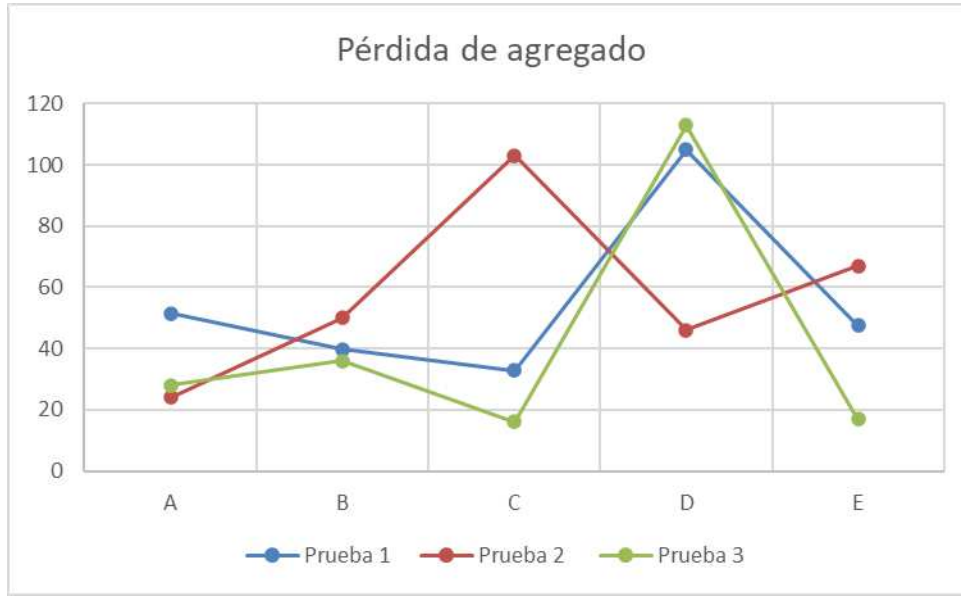


Figura 60. Pérdida de agregado. Fuente: Propia

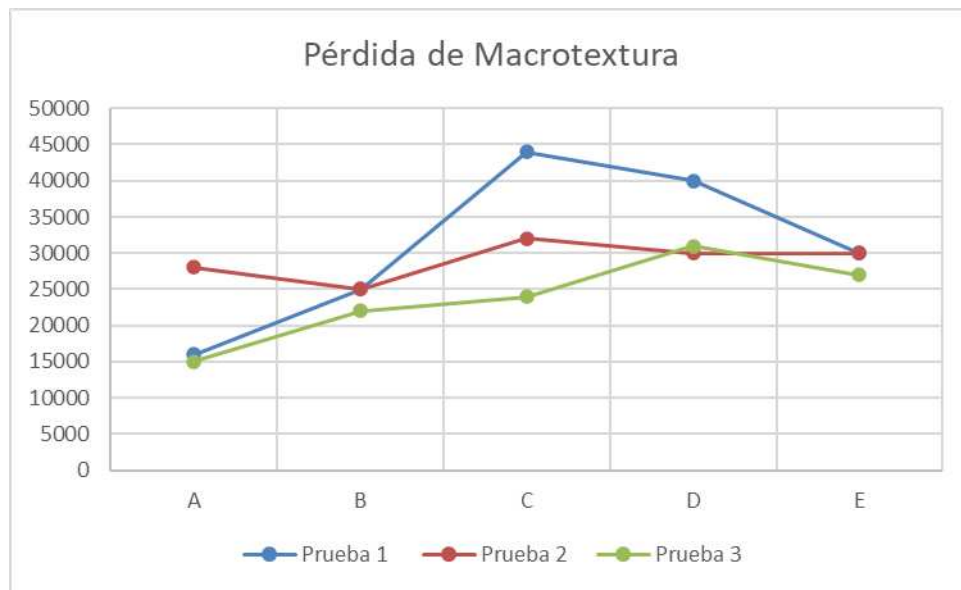


Figura 61. Pérdida de macrotextura. Fuente: Propia

Contemplándose una menor pérdida de macrotextura en la prueba que no tiene PET no cumpliéndose así hipótesis, aunque también se observa que esa misma prueba tiene un alto grado de desprendimiento del agregado, qué, aunque no es el principal caso de estudio es importante resaltar, y que la muestra con un porcentaje de PET del 5% tiene la mayor pérdida de macrotextura y la menor pérdida de agregado también en la prueba 1, al igual que la prueba al 7.5% de PET en las pruebas 2 y 3.

CONCLUSIONES

La investigación demostró que el uso de PET en mezclas frías empleadas en superficies de rodamiento no conserva de mejor manera la macrotextura, porque las muestras que tenían un porcentaje menor de PET y/o una cantidad nula, fueron en su mayoría las que sufrieron menos pérdida de macrotextura esto se debe a que el PET se desprende menos que el agregado pétreo, y tiene una menor masa, generando menos intersticios entre las partículas.

En lo que sí se desempeña mejor es en la pérdida de agregado pétreo, con esta investigación se abren líneas de investigación futura con el uso de polímeros, se pueden mezclar en caliente con asfalto sin emulsificar y usar otro tipo de polímeros, al igual que medir otro tipo de parámetros, en este caso fue la pérdida de macrotextura, pero podrían funcionar también como elementos estructurales en un pavimento, ya que su resistencia mecánica es muy alta además se demostró en esta investigación que al intemperizar y sufrir desgaste el material se comporta de una manera aceptable, pudiéndose usar en otro tipo de capas en el pavimento. A continuación, se describen las conclusiones principales de la investigación.

- La macrotextura se conservó menos en las muestras con 5% y 7% de PET siendo también las que tuvieron más desprendimiento de agregado
- Un desprendimiento alto de la muestra no refleja precisamente una conservación de la macrotextura
- Las muestras con menor desprendimiento fueron la C y D siendo el 5% y 7% de PET respectivamente.
- La muestra A que no tenía PET conservó mejor la macrotextura
- La hipótesis no se cumplió, ya que hubo mayor pérdida de macrotextura agregando PET
- Como línea de investigación futura queda experimentar con otro tipo de polímeros y con mezclas calientes de asfalto.

REFERENCIAS

- Ali M. Babalghaith, , Hamad A. Alsoliman, Abdulrahman S., & Al-Suhaibani. (2016). Comparison of Rheological Properties for Polymer Modified Asphalt Produced in Riyadh. *International Journal of Civil Environmental Engineering*, 10, 197–201.
- Alsolieman, H. A., Babalghaith, A. M., Memon, Z. A., Al-Suhaibani, A. S., & Milad, A. (2021). Evaluation and Comparison of Mechanical Properties of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. *Polymers*, 13(14), 2282. <https://doi.org/10.3390/polym13142282>
- Amirkhanian, S. (2020). Utilization of scrap plastics in asphalt binders. In *Eco-Efficient Pavement Construction Materials* (pp. 13–32). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00002-3>
- Asphalt Institute. (2014). *Asphalt mix design methods*.
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus*.
- Attaelmanan, M., Feng, C. P., & AI, A.-H. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2764–2770. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037>
- Cui, P., Wu, S., Xiao, Y., Yang, C., & Wang, F. (2020). Enhancement mechanism of skid resistance in preventive maintenance of asphalt pavement by steel slag based on micro-surfacing. *Construction and Building Materials*, 239, 117870. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117870>
- Flintsch, G. W., McGhee, K. K., Izeppi, E. L., & Najafi, S. (2012). The little book of tire pavement friction. *Pavement Surface Properties Consortium*, 1, 12–13.
- Fuentes-Audén, C., Sandoval, J. A., Jerez, A., Navarro, F. J., Mart\`inez-Boza, F. J., Partal, P., & Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen. *Polymer Testing*, 27(8), 1005–1012.
- Fwa, T. F. (2021). Determination and prediction of pavement skid resistance—connecting research and practice. *Journal of Road Engineering*, 1, 43–62. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2021.12.001>
- Gautam, P. K., Kalla, P., Jethoo, A. S., Agrawal, R., & Singh, H. (2018). Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. *Construction and Building Materials*, 180, 239–253. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.067>
- Hnslođlu, S., & Ađar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix. *Materials Letters*, 58(3–4), 267–271.
- Horne, W. B., & Joyner, U. T. (1966). Pneumatic tire hydroplaning and some effects on vehicle performance. *SAE Transactions*, 623–650.

- Huang, Y. H. (Yang H. (2004). *Pavement analysis and design*. Pearson/Prentice Hall.
- INTERNATIONAL SLURRY SURFACING ASSOCIATION. (2010). *Normas de rendimiento recomendadas para slurry seal de asfalto emulsionado A105*.
- Ma, Y., Zhou, H., Jiang, X., Polaczyk, P., Xiao, R., Zhang, M., & Huang, B. (2021). The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review. *Cleaner Materials*, 2, 100031.
- Meyer, W., & Kummer, H. (1969). *Pavement friction and temperature effects*.
- Moore, D. F., & Geyer, W. (1972). A review of adhesion theories for elastomers. *Wear*, 22(2), 113–141. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(72\)90271-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(72)90271-2)
- Papagiannakis, A. T., Masad, E. A. P. E., & Wiley, J. (2008). *Pavement Design and Materials*. <http://www.wiley.com/go/permissions>.
- Pranjić, I., Deluka-Tibljaš, A., Cuculić, M., & Šurdonja, S. (2020). Influence of pavement surface macrotexture on pavement skid resistance. *Transportation Research Procedia*, 45, 747–754. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.02.102>
- Rahman, W. M. N. W. A., & Wahab, A. F. A. (2013). Green Pavement using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt. *Procedia Engineering*, 53, 124–128. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.018>
- Rodriguez, O. (2009). *Evaluation of pavement surface friction seasonal variations*. Tesis Master of Science. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Rondón, H. A., Fredy, Q., Reyes, A., Hugo, L., Rondón, A., & Lizcano, A. R. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*.
- Sabey, B. E. (1966). *Road surface texture and the change in skidding resistance with speed*.
- Segundo, I. R., Silva, L., Palha, C., Freitas, E., & Silva, H. (2021). Surface rehabilitation of Portland cement concrete (PCC) pavements using single or double surface dressings with soft bitumen, conventional or modified emulsions. *Construction and Building Materials*, 281, 122611.
- Sezen, H., & Fisco, N. (2013). EVALUATION AND COMPARISON OF SURFACE MACROTEXTURE AND FRICTION MEASUREMENT METHODS. *Journal of Civil Engineering and Management*, 19(3), 387–399. doi:10.3846/13923730.2012.746237
- Singh, G. D., Sharma, V. K., Sangma, B., Kumar, R., Senthil, K., & Singh, A. P. (2022). Experimental study on bituminous concrete pavement using low density polyethylene and sasobit. *Materials Today: Proceedings*, 52, 2109–2114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.387>
- TRB. (2011). *Achieving Traffic Safety Goals in the United States Lessons from Other Nations Committee for the Study of Traffic Safety Lessons from Benchmark Nations OF THE NATIONAL ACADEMIES*. www.TRB.org

- Vaiana, R., Capiluppi, G. F., Gallelli, V., Iuele, T., & Minani, V. (2012). Pavement surface performances evolution: an experimental application. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 1149–1160.
- Vasudevan, R., Sekar, A. R. C., Sundarakannan, B., & Velkennedy, R. (2012). A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way–Application in construction of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, 28(1), 311–320.
- Wambold, J., Henry, J., & Hegmon, R. (1986). Skid Resistance of Wet-Weather Accident Sites. In *The Tire Pavement Interface* (pp. 47-47–14). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP20001S>
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binder. *Construction and Building Materials*, 21(1), 66–72.