



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA

AMBIENTAL

Que para obtener el grado de:

Maestra en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta la tesis titulada:

**Sustitución de agregados pétreos con material de PET en mezclas
asfálticas**

Presenta:

Ing. Michelle Montserrat Hernandez Pablo

Director de tesis:

Dr. Hugo Luis Chávez García

Co - directora de tesis:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Morelia, Michoacán. Septiembre 2025



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Presenta la tesis como opción a titulación:

Sustitución de agregados pétreos con material de PET en mezclas asfálticas

La alumna:

Michelle Montserrat Hernandez Pablo

1418315f@umich.mx

Director de tesis:

Dr. Hugo Luis Chávez García

Co - directora de tesis:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

SINODALES

Dr. Hugo Luis Chávez García

Presidente

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Secretario

M.I. Marco Antonio Mondragón Ornelas

Vocal

Dr. Ezequiel García Rodríguez

Vocal

Dra. Elizabeth Contreras Marin

Vocal

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
DEDICATORIA	3
AGRADECIMIENTOS	4
JUSTIFICACIÓN	6
HIPÓTESIS.....	9
OBJETIVOS	9
1. MARCO TEÓRICO	10
1.1 COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	10
1.1.1 ASFALTO.....	10
1.1.2 AGREGADOS PÉTREOS.....	16
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	17
1.2.1 COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	17
1.2.2 TIPOLOGÍA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	18
1.2.3 EMPLEO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	20
1.3 PET (Polietileno de tereftalato)	22
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PET	22
1.3.2 PRESENCIA DEL PET EN MÉXICO.....	23
1.4 ANTECEDENTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIONES	26
1.4.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DIVERSOS TIPOS DE ADICIÓN	26
1.4.2 ADICIÓN DE PET A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	27
1.5 GESTIÓN AMBIENTAL	29
1.5.1 ECONOMÍA LINEAL.....	31
1.5.2 ECONOMÍA CIRCULAR.....	32
2 METODOLOGÍA.....	34
2.1 MATERIALES	34
2.1.1 AGREGADOS PÉTREOS.....	35
2.1.2 ASFALTO.....	37
2.1.3 BOTELLAS DE PET.....	37

2.2 MÉTODO MARSHALL	37
2.2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO AL ASFALTO	38
2.2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO A LA MEZCLA ASFÁLTICA	39
3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	39
3.4 ASFALTO	39
3.5 PET	45
3.5.2 OBTENCIÓN DEL AGREGADO A PARTIR DE PET	45
3.6 AGREGADOS PÉTREOS	48
3.6.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS	48
3.7 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS: MÉTODO MARSHALL	58
3.7.2 INTEGRACIÓN DE LA MUESTRA	59
3.7.3 CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO	61
3.7.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES	62
3.7.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LOS ESPECÍMENES MARSHALL	67
3.7.6 ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL	69
4 RESULTADOS	70
4.4 ASFALTO	70
4.5 PET	71
4.6 AGREGADOS PÉTREOS	72
4.7 MEZCLAS ASFÁLTICAS	74
4.8 ECONOMÍA CIRCULAR	93
5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	97
6 CONCLUSIONES	106
REFERENCIAS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Plásticos reciclados en México (ANIPAC, 2021)	6
Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas según su parámetro. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2005).....	10
Tabla 3. Clasificación de los materiales asfálticos (N-CMT-4-05-001, 2005).....	12
Tabla 4. Clasificación de las emulsiones asfálticas. (N-CMT-4-05-001, 2005).....	14
Tabla 5. Clasificación de asfaltos rebajados. (N-CMT-4-05-001, 2005)	15
Tabla 6. Clasificación de materiales asfálticos y sus usos más comunes. (N-CMT-4-05-001, 2005)	15
Tabla 7. Clasificación de suelos con base en el sistema SUCS (M-MMP-1-02, 2003)	17
Tabla 8. Propiedades del PET (Richardson & Lokensgard, 1999)	22
Tabla 9. Residuos de PET anual en diversos países	25
Tabla 10. Resultados del análisis de gases de efecto invernadero (Movilla Quesada, et al., 2021)	28
Tabla 11. Comparación de metodologías de incorporación de PET en mezclas asfálticas	35
Tabla 12. Determinación de las variables de la investigación	35
Tabla 13. Llenado de la prueba de penetración en cementos asfálticos	41
Tabla 14. Cálculo y llenado de análisis granulométrico para agregados finos	50
Tabla 15. Llenado y cálculo del análisis granulométrico del agregado grueso	51
Tabla 16. Medidas de los especímenes para pruebas Marshall (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004).....	58
Tabla 17. Formato de llenado para integración de la muestra MC-0%	61
Tabla 18. Coeficiente asfáltico, según las características del material (Salazar Amaya, Mondragón Ornelas , & Gómez Valdovinos, 2022).....	62
Tabla 19. Mezclas asfálticas a realizar	62
Tabla 20. Porcentajes de asfalto para la elaboración de mezclas asfálticas.....	63
Tabla 21. Formato para la cantidad de agregados por mallas	63
Tabla 22. Formato para la cantidad de agregados por porcentaje (Mezcla control).....	64
Tabla 23. Formato para la cantidad de agregados por porcentaje (Mezclas de PET).....	64
Tabla 24. Resumen de mezclas y especímenes.....	65
Tabla 25. Formato de elaboración de pastillas por determinación del agregado por malla.....	65
Tabla 26. Formato de elaboración de pastillas por porcentaje de agregado	66
Tabla 27. Formato de llenado para propiedades volumétricas de las pastillas	69
Tabla 28. Resultado de la prueba de penetración en cementos asfálticos	70
Tabla 29. Resultados de la prueba de punto de ignición en asfalto	70
Tabla 30. Resultados de la prueba de punto de reblandecimiento	71
Tabla 31. Resumen de resultados de las densidades de los materiales	72
Tabla 32. Resumen de resultados de % de absorción	72
Tabla 33. Resultados de la prueba de partículas lajeadas y alargadas	74
Tabla 34. Resumen de proporción de los agregados para diferentes mezclas	76
Tabla 35 . Cantidades de los agregados para la integración de la muestra de todas las mezclas .	76
Tabla 36. Resultado del contenido mínimo de asfalto	77

Tabla 37. Cantidades de agregados para 1km de vía para todas las mezclas asfálticas	94
Tabla 38. Tabla resumen del contenido de las leyes y normas de Jalisco y el EDOMEX	96
Tabla 39. Tabla resumen del mejor comportamiento respecto a cada mezcla.....	100

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015)	7
Ilustración 2. Composición del asfalto (Ponce, 2014)	11
Ilustración 3. Mapa de clasificación de zonas en la República Mexicana. (N-CMT-4-05-001, 2005)	14
Ilustración 4. Criterio de diseño de mezclas Marshall (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004)	19
Ilustración 5. Graduaciones para mezclas SUPERPAVE (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004).....	20
Ilustración 6. Capas de un pavimento flexible. (Villaroel, 2016).....	21
Ilustración 7. Capas de un pavimento rígido. (Giordani & Leone, 2002)	21
Ilustración 8. Composición química del PET (Plastics Technology México, 2023)	22
Ilustración 9. Campaña de reciclaje de PET. (ECOCE , 2019)	24
Ilustración 10. Cifras de resinas de PET en México. (ECOCE, 2022)	25
Ilustración 11. Tasas de acopio de PET desde 2012 a 2022. (ECOCE, 2022)	25
Ilustración 12. Resultados de liberación de micro plásticos en mezclas asfálticas con PET (Enfrin, Myszka, & Giustozzi, 2022)	29
Ilustración 13. Modelo de la economía lineal (Hurtado, 2020)	31
Ilustración 14. Modelo de la economía circular (Parlamento Europeo, 2023)	33
Ilustración 15. Requisitos de granulometría del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)	36
Ilustración 16. Requisitos de calidad del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008).....	36
Ilustración 17. Requisitos granulométricos del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)	36
Ilustración 18. Requisitos de calidad del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008).....	37
Ilustración 19. Ficha técnica de asfalto PG 64-16 (Mega Asfaltos, 2023)	37
Ilustración 20. Secuencia del método de diseño Marshall. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016).....	38
Ilustración 21. Molde con asfalto para la prueba de penetración en cementos asfálticos	40
Ilustración 22. Prueba de penetración en cementos asfálticos.....	41
Ilustración 23. Proceso de la prueba de punto de ignición	42
Ilustración 24. Preparación del asfalto en los moldes para probar.	43
Ilustración 25. Prueba de ductilidad en asfalto.	44
Ilustración 26. Prueba de punto de reblandecimiento en el asfalto.....	45
Ilustración 27. Botella de PET y sus partes	46
Ilustración 28. Hojuelas de PET	46
Ilustración 29. Estado bruto del material hecho de PET	47
Ilustración 30. Trituración del agregado hecho de PET	47
Ilustración 31. Muestreo y cuarteo de materiales pétreos.....	48
Ilustración 32. Cribado manual de agregados gruesos.....	49
Ilustración 33. Equipo de cribado mecánico del laboratorio.	50
Ilustración 34. Material de PET en la prueba de densidades	54
Ilustración 35. Procedimiento de absorción en agregados.....	55

Ilustración 36. Material en cada malla para realizarle la prueba de partículas alargadas y lajeadas	56
Ilustración 37. Calibrador de longitudes (M-MMP-4-04-005, 2025)	56
Ilustración 38. Prueba de partículas lajeadas y alargadas en el material grueso.....	57
Ilustración 39. Calibrador de espesores (M-MMP-4-04-005, 2025)	57
Ilustración 40. Partículas lajeadas y alargadas en los agregados de PET	58
Ilustración 41. Requisitos de calidad de mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo ($\Sigma L \leq 1 \times 10^6$), Martillo Marshall. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2020).....	59
Ilustración 42. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (N-CMT-4-04, 2008).....	60
Ilustración 43. Equipo necesario para elaboración de especímenes Marshall.	67
Ilustración 44. Preparación de la muestra con parafina	68
Ilustración 45. Realización de la prueba de propiedades volumétricas	68
Ilustración 46. Preparación del equipo para la prueba de estabilidad y flujo Marshall.	69
Ilustración 47. Especímenes en baño María y probado en la prensa	70
Ilustración 48. Asfalto al término de la prueba de ductilidad	71
Ilustración 49. Granulometría del agregado hecho de PET	72
Ilustración 50. Agregado pétreo utilizado para la elaboración de la MC-0%.....	77
Ilustración 51. Agregado fino para la elaboración de la MC-0%	78
Ilustración 52. Material pétreo grueso con la sustitución del 5% de PET	78
Ilustración 53. Material pétreo grueso con la sustitución del 10% de PET	79
Ilustración 54. Material pétreo grueso con la sustitución del 15% de PET	79
Ilustración 55. Proceso inicial de la realización de especímenes Marshall	80
Ilustración 56. Mezclado final para la elaboración del espécimen Marshall.	80

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Matriz FODA aplicado a la economía circular	34
Gráfico 2. Límites granulométricos para la integración de la muestra	60
Gráfico 3. Granulometría de la arena volcánica	73
Gráfico 4. Granulometrías en agregados gruesos	73
Gráfico 5. Integración de la muestra para el agregado pétreo	74
Gráfico 6. Integración de la muestra del agregado pétreo natural correcta	75
Gráfico 7. Integración de la muestra para las mezclas con agregado de PET	76
Gráfico 8. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MC-0%	81
Gráfico 9. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MC-0%	82
Gráfico 10. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MC-0%.....	82
Gráfico 11. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-5%.....	83
Gráfico 12. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-5%.....	84
Gráfico 13. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-5%	84
Gráfico 14. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-10%.....	85
Gráfico 15. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-10%.....	86
Gráfico 16. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-10%	86
Gráfico 17. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-15%.....	87
Gráfico 18. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-15%.....	88
Gráfico 19. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-15%	88
Gráfico 20. Resumen de valores de Gmb para todas las mezclas asfálticas	89
Gráfico 21. Estabilidad Marshall para la mezcla control (MC-0%)	90
Gráfico 22. Flujo Marshall de los especímenes de la MC-0%	90
Gráfico 23. Estabilidades para la mezcla con PET al 5% (MP-5%).....	91
Gráfico 24. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 5% (MP-5%).....	91
Gráfico 25. Estabilidades para la mezcla con PET al 10% (MP-10%).....	92
Gráfico 26. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 10% (MP-10%).....	92
Gráfico 27. Estabilidades para la mezcla con PET al 15% (MP-15%).....	93
Gráfico 28. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 15% (MP-15%).....	93
Gráfico 29. Resumen de las estabilidades para todas las mezclas	98
Gráfico 30. Resumen de los valores de flujo para todas las mezclas	99
Gráfico 31. Resumen de los porcentajes de vacíos de las mezclas.....	100
Gráfico 32. Valores de flujo para los mejores comportamientos de todas las mezclas	101
Gráfico 33. Valores de vacíos para los mejores comportamientos de todas las mezclas	101
Gráfico 34. Valores de estabilidad para los mejores comportamientos de todas las mezclas	102
Gráfico 35. Resumen de los mejores comportamientos de las mezclas por porcentaje de asfalto	103
Gráfico 36. Comparación de los valores de sustitución con la mezcla control	103
Gráfico 37. Matriz FODA aplicado a las mezclas asfálticas con sustitución de PET	105

RESUMEN

De acuerdo al compromiso ambiental que se tiene de parte de todos los sectores se han buscado soluciones ambientales a problemas actuales. La construcción es un sector imprescindible para el desarrollo nacional, pero demandante de recursos naturales. Por lo que en este trabajo se busca la implementación de la sustitución de agregados pétreos naturales, por aquellos que se obtienen del tratado térmico- mecánico de botellas de PET en porcentajes del 5% (MP-5%), 10% (MP-10%) y 15% (MP-15%) con respecto al volumen de la mezcla. La sustitución del agregado pétreo natural por el agregado de PET fue mediante el método seco en las mezclas asfálticas. Se elaboraron 4 tipos de mezclas siguiendo el método Marshall, considerando una mezcla control (MC-0%) para su comparación con las mezclas con sustitución. Se evaluaron 5 porcentajes de asfalto, del 4.5% al 6.5% en intervalos de 0.5%. Se elaboraron especímenes Marshall con la finalidad de evaluar sus propiedades volumétricas y mecánicas, para conocer su resistencia, capacidad de deformación, cantidad de vacíos. Parámetros que son fundamentales para conocer su trabajabilidad y durabilidad ya aplicado a un pavimento asfáltico. Los valores obtenidos fueron comparados con la normativa mexicana y americana vigente. Los valores obtenidos para la prueba de estabilidad Marshall, determinaron que el mejor valor se encuentra en la mezcla MP-15% con 4.5% de asfalto, mientras que para cantidades mayores de asfalto como 6.5% los mejores valores se obtienen en las mezclas MC-0% y MP-5%. Los valores de flujo trabajaron de manera correcta para todas las mezclas y todos los porcentajes de asfalto. La cantidad de vacíos de nuestras mezclas se vieron mejoradas con la implementación del agregado de PET, reduciéndolos considerablemente a comparación de una mezcla asfáltica convencional. A mayor cantidad de asfalto, los valores de estabilidad y porcentaje de vacíos fueron más favorables. Teniendo en promedio el mejor comportamiento para todas las mezclas en los porcentajes del 6% y 6.5% de asfalto.

Palabras clave: Mezclas asfálticas, agregados gruesos, PET.

ABSTRACT

In alignment with the environmental commitment shared by all sectors, environmental solutions to current problems are being sought. The construction sector is essential for national development but is significant consumer of natural resources. Therefore, this work investigates the implementation the substituting of natural stone aggregates with those obtained from the thermomechanical treatment of PET bottles at replacement rates of 5% (MP-5%), 10% (MP-10%), and 15% (MP-15%) by mix volume. The replacement of the natural aggregate with PET aggregate was performed using the dry process method for asphalt mixtures. Four types of mixtures were produced following the Marshall mix design method, including a control mix (MC-0%) for comparison with the modified mixes. Five asphalt binder contents were evaluated, from 4.5% to 6.5% in 0.5% increments. Marshall specimens were fabricated to evaluate their volumetric and mechanical properties, to determine their strength, deformation capacity, and void content. These parameters are fundamental for assessing the workability and durability of the mixture once applied in an asphalt pavement. The obtained values were compared with current Mexican and American standards. The results from the Marshall stability test determined that the highest value was found in the MP-15% mix with 4.5% asphalt content, whereas for higher asphalt contents, such as 6.5%, the best values were obtained for the MC-0% and MP-5% mixes. The flow values performed adequately for all mixes and all asphalt contents. The air void content of our mixes was improved with the incorporation of PET aggregate, reducing it considerably compared to a conventional asphalt mixture. With a higher asphalt binder content, the stability and air void values were more favorable. On average, the best overall performance for all mixes was observed at asphalt contents of 6.0% and 6.5%.

Key words: Asphalt mixtures, Stone aggregates, PET.

DEDICATORIA

En memoria de mi abuelita **Elvira Erape**, quien este año partió de mi lado. Pero sé que su alegría y amor siempre estará conmigo. Tus bendiciones nunca me han dejado sola. Gracias por todo y por esperarme. Te amo y te extraño muchísimo mi Elvirita.

A mi madre **Dalinda Pablo**, gracias por no dejarme sola nunca, por enseñarme que el amor incondicional existe y de verdad espero ser realmente al menos la mitad de lo que tú ves en mí. Te amo mamita, eres mi vida entera.

A mi tía **Alma Leticia**, gracias por confiar tanto en mí, eres la persona que más me ha alentado a ser quien soy, por desearme tantas cosas bonitas, darme tanta libertad, apoyo y amor. Te amo tía.

Ustedes son mi más grande apoyo y amor, soy la más afortunada de tenerlas en esta vida. Todo lo que soy y tengo es por y para ustedes. **GRACIAS**.

A quienes cuidan de mi desde otro lugar, mi abuelito **Francisco Pablo** yo sé que nunca me has dejado sola, tus valores y enseñanzas siempre están conmigo. A mi papá **Francisco Hernandez**, sé que también cuidas mis caminos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a **SECIHTI** por la oportunidad que me brindó, al financiar la realización de este proyecto.

A la **Facultad de Ingeniería Civil** la cual ha sido mi casa desde 2017, apoyándome en mi formación académica, teniendo a mi alcance muchos profesores dispuestos a colaborar.

A la **Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental**, que me brindó la oportunidad de continuar con mi formación en un posgrado, dándome herramientas necesarias para mi desarrollo en el área de investigación y profesional.

A mis asesores y vocales:

Dr. Hugo Luis Chávez García gracias por aceptarme como su asesorado y acompañarme durante esta investigación y compartir su conocimiento conmigo.

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán por compartir su enseñanza y apoyarme en la realización mi estancia de investigación, usted nos ha acompañado siempre.

De igual manera al **Dr. Ezequiel García Rodríguez** y al **M.I. Marco Antonio Mondragón Ornelas**, quienes estuvieron siempre dispuestos a ofrecerme su ayuda en la experimentación de esta investigación. Su experiencia y disposición fueron un gran apoyo.

A la **Dra. Elizabeth Contreras Marín** quién siempre estuvo dispuesta a apoyarme en todo y a pesar de la diferencia horaria siempre disponible. Le agradezco mucho también el haberme recibido en Sevilla para mi estancia de investigación. Por ello también agradezco a la **Universidad de Sevilla**, especialmente a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura y el **Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno**. Que me brindaron las herramientas necesarias para la estructura de esta investigación. Especialmente a mi responsable durante la estancia el **Dr. Antonio Jaramillo Morilla**

Infinitas gracias.

A quienes me apoyaron:

Al **M.I. Cipriano Bernabé** por la extensa ayuda y confianza en este proyecto desde el día 1 hasta el final. Gracias por las miles de dudas resueltas, la ayuda en la experimentación y por haber compartido su conocimiento y tiempo conmigo.

A la **Ing. Viridiana González** por su gran ayuda en la experimentación, definitivamente fuimos el mejor equipo para hacer pastillas. Gracias por hacer más ameno el trabajo y por las infinitas risas en el laboratorio.

Al **Dr. Mateo Alfredo Castillo Ceja** quien no dudo ni un minuto en compartir todo su conocimiento y experiencia conmigo, gracias por confiar en mí y en mi trabajo. El mundo necesita muchas personas como usted.

A quienes me acompañaron:

A mi incondicional **Karla Orta** por todo su apoyo de todas las formas posibles durante todos estos años, cuantas experiencias y vida compartida, gracias por traer a **Carlitos** a mi vida también, siempre estaré para ustedes.

Mi roomie y amiga **Lizbeth Vargas** siempre dispuesta a ayudarme en todo hasta para recortar PET, gracias por todo. De igual manera por compartirme a tus amigos (mis ahora amigos arquitectos) quienes también estaban dispuestos a ayudarme siempre.

A **Litzy “Payoli”** por escucharme en todo momento y terminar riéndonos siempre.

A mis chicas Sevillanas, **Lía, Maybe y Lupita** agradezco haber vivido esa increíble experiencia con ustedes. Gané una amistad con todas y a unas expertas catadoras de café y pan de Brasil jaja. “Pero, ¿qué dices!”.

Lupita Gómez, quien me acompañó en todo este trayecto desde el día 1. Gracias por estar siempre echándome porras en todo. Hasta que las materias nos separaron... jaja me encantó haber descubierto las ensaimadas contigo, nos vemos en el 2034 en La Canasta.

A mis compañeros de la maestría, el super team de la MCIA generación 2023-2025. Especialmente a **Osmar, Hiram, Yael, Jaqui, Alfredo, Maritza, Deyvi** por brindarme su amistad y apoyo siempre. Nos vemos en el próximo intercambio.

A mi familia, mucho de esto es gracias a ustedes. A toda la fam. **Pablos Pablo** por el cariño, la confianza y apoyo que siempre me han dado en todo momento.

A los hnos. Pablo Erape, en especial a mis tíos **Adonis, Hereida, Vladimir, Cecilia, Nancy**. Quienes siempre me han apoyado en este camino desde la distancia.

Mis primos, **Francisco Pablo, Nancy Baltazar y Destiny Pablo**. Gracias por todos los momentos buenos y las distracciones que me ofrecían siempre en mis vacaciones.

Los quiero mucho.

Al servicio social del Laboratorio de Materiales por darme su ayuda en este proceso y todas las personas que laboran ahí, siempre dispuestos a apoyarme en todo. Gracias.

Finalmente quisiera agradecer a la vida, Dios y el Universo por haberme permitido culminar esta etapa en mi vida, ha sido una experiencia increíble y llena de emociones.

Gracias vida, soy muy afortunada.

JUSTIFICACIÓN

Durante muchos años se ha escuchado la palabra *reciclar* o *reciclaje*, sin embargo, su definición y ejecución puede ser ambigua y no ser del todo completa. Reciclar significa: Someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar (Real Academia Española, 2023). Teniendo eso como definición podemos entender que la mayoría de materiales pueden ser sometidos a esta acción, con finalidad de que pueda ser empleado en lo que originalmente era o que sea apto para un nuevo uso.

En la actualidad el Tereftalato de polietileno (PET) es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial en su presentación más común; las botellas de plástico. Esto debido directamente a su practicidad para almacenar y transportar líquidos. Pero desafortunadamente son de un solo uso, lo que nos indica que su producción es mayor a su reciclaje. Generando de esta manera una gran cantidad de botellas que ocasiones nunca llegan a reciclarse y fácilmente se convierten en residuos mismos que se pueden encontrar muy fácilmente en calles, carreteras, bosques, etc., y que pasado el tiempo su destino final generalmente llegan a ser los ríos, lagos y mares. Afectando de manera directa el ecosistema y a las especies endémicas.

Para el 2021 en México se consumió un total de 5 millones 917,000 toneladas de plástico. De las que se reciclaron 1 millón 913,710 toneladas (ANIPAC, 2021) específicamente de la siguiente manera:

Tabla 1. Plásticos reciclados en México (ANIPAC, 2021)

TIPO DE PLÁSTICO	% RECICLADO	CANTIDAD (ton)
Polietileno	51.2%	979,819.52
PET	22.1%	422,929.91
Polipropileno	18.2%	348,295.22
PVC	2.1%	40,187.91
Poliestireno	1.8%	34,446.78

Lo que nos deja con un 7.15% de PET reciclado del total consumido en México.

México es uno de los países con mayor consumo de PET en el mundo, además de que exporta alrededor de 100 mil toneladas aproximadamente de manera anual (Páez, 2022). La industria del plástico es importante para México de como una manera de aportación económica. Pudiendo cuestionar la sustentabilidad que llega a tener la producción y consumo del mismo.

Considerando la situación ambiental alrededor del mundo la Organización de las Naciones Unidas (ONU) presentó la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (ONU, 2015), enfocado a la búsqueda de herramientas para mitigar el deterioro ambiental proporcionando ideas o proyecciones que brindan soluciones en varias áreas de la sociedad, con el fin de favorecer la calidad de vida de las personas, la preservación del planeta y prosperidad de la sociedad a través de 17 objetivos de desarrollo sostenible.



Ilustración 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, 2015)

Misma que fue aprobada en la asamblea general del 25 de septiembre del 2015 (ONU, 2015).

Con la propuesta de estos objetivos se busca que todas las personas que participan en la sociedad colaboren. Desde individuos hasta industrias y sectores completos. Una de las industrias más importantes alrededor del mundo es la construcción, pues es necesaria para el desarrollo y mejora de calidad de vida para la sociedad. Sin embargo, también representa un sector que tiene que hacer uso de diversos recursos naturales, muchos de ellos no son renovables. Que, considerando la situación actual del medio, podría verse comprometida la sustentabilidad a la hora de la ejecución de diversos proyectos. Es una industria indispensable, pero se debe llegar a considerar la implementación de sustentabilidad de los objetivos de la agenda 2030. Por ello, considerando en cuáles objetivos se podría trabajar serían (ONU, 2015):

1. Salud y bienestar
2. Agua limpia y saneamiento
3. Industria, innovación e infraestructura
4. Ciudades y comunidades sostenibles
5. Producción y consumo responsables
6. Alianzas para lograr los objetivos

Sin embargo, existe una relación indirecta con todos los objetivos de la agenda 2030.

Una de las principales implementaciones de esta industria, es en la construcción de carreteras, que generalmente son realizadas con mezclas asfálticas. Las mezclas asfálticas están compuestas por asfalto y agregados pétreos. Ambos son materiales no renovables. Generando así una demanda de materias primas importantes: agregados pétreos, derivados de petróleo, madera, agua, etc.

La construcción de carreteras, su rehabilitación y mantenimiento, son aspectos que no se pueden parar o dejar a un lado. Ya que representan un beneficio social y económico en cualquier país. Más no por ello se debe dejar a un lado la responsabilidad ambiental que se tiene. En atención a lo cual se han buscado nuevas técnicas más sustentables y reduciendo en la medida de lo posible la

explotación de dichos recursos, buscando también no comprometer la calidad a la hora de su implementación. La sustitución de estos recursos no renovables, por otros materiales se ha convertido en una opción viable, es decir, buscar la creación de materiales a partir de otros materiales que llegan a ser considerados basura o residuos. Mismos que si no llegan a tener un reciclaje serán causantes de mayor contaminación y las consecuencias que esto incluye.

A la fecha han sido alrededor de 10 años en los que se busca la implementación y ejecución de estos objetivos, aunque situaciones inesperadas como la pandemia de COVID-19 hace que varios de ellos no se logren cumplir o que exista mayor dificultad y trabajo en su desarrollo.

HIPÓTESIS

La sustitución parcial de agregados pétreos por partículas de PET reciclado en una mezcla asfáltica densa modifique sus propiedades físicas y mecánicas. Se espera que la incorporación del agregado de PET incremente la estabilidad Marshall, resistiendo de mejor manera a la deformación por las propiedades del material polimérico. De esta manera se generaría una mezcla asfáltica sustentable.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente tipo densa, mediante el método Marshall, sustituyendo parcialmente el agregado pétreo grueso natural por partículas de PET (proveniente de botellas) en porcentajes volumétricos establecidos, con el fin de evaluar su comportamiento mecánico para conocer su viabilidad y contribución a la reducción de residuos plásticos en el ambiente.

OBJETIVOS PARTICULARES

1. Evaluar el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas modificadas con PET
2. Obtención de parámetros para poder considerarlo como una mezcla asfáltica sustentable
3. Conocer la contribución que se tendría con respecto al ambiente, economía y sociedad

1. MARCO TEÓRICO

1.1 COMPONENTES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas están compuestas por dos materiales:

- Asfalto
- Agregados pétreos

Con la unión de ambos se pueden crear diversos tipos de mezclas asfálticas que se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 2. Clasificación de mezclas asfálticas según su parámetro. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2005)

PARÁMETRO	CLASIFICACIÓN
Fracciones de agregado pétreo	Mastique asfáltico
	Mortero asfáltico
	Macadam asfáltico
	Concreto asfáltico
Temperatura	Mezclas en frío
	Mezclas en caliente
Porcentaje de vacíos de aire	Densas o cerradas (menos del 6%)
	Semidensas o semicerradas (entre el 6% - 12%)
	Abiertas y porosas (entre el 12% - 18% o mayor del 20%)

Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90-95% de agregados pétreos incluyendo diversos tamaños entre ellos agregados gruesos (grava) y agregados finos (arena). El porcentaje restante corresponde al asfalto.

Cada uno de ellos cumple requerimientos específicos y puede tener ciertas modificaciones en su composición.

1.1.1 ASFALTO

Es un material cementante y llega a variar en su consistencia de acuerdo a los cambios de temperatura que pueda llegar a tener. De acuerdo con la SCT, el asfalto es un material bituminoso de color negro con elementos que proporcionan características de consistencia, aglutinación y ductilidad. (N-CMT-4-05-001, 2005)

Obtención del asfalto

Al ser un material derivado del petróleo es necesaria su refinación a partir del crudo de petróleo. Una refinería es el centro de trabajo donde el petróleo crudo se transforma en cualquiera de sus

derivados. Esta transformación se logra mediante los procesos de: destilación atmosférica o primaria, destilación al vacío, hidro-desulfuración, desintegración térmica, desintegración catalítica, alquilación y reformación catalítica, entre otros. (Secretaría de Energía , 2015)

Propiedades químicas del asfalto

El asfalto está compuesto por hidrocarburos con combinaciones moleculares de Hidrógeno y Carbono. Y puede llegar a tener algunos residuos de azufre, oxígeno, nitrógenos, entre otros.

Cuando el asfalto es disuelto con un heptano se separa en dos partes:

- *Asfaltenos*
Estos no se disuelven con el heptano y usualmente son de color negro u oscuro. Y estos son los responsables de aportar el color y la dureza al asfalto.
- *Maltenos*
Estos logran disolverse con el heptano y son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites.
Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas, mientras que los aceites son el medio de transporte de los asfaltenos y resinas.

La proporción de estos compuestos pueden variar por diversos factores: Altas temperaturas, tipos de agregados, exposición a la luz y oxígeno (USON).

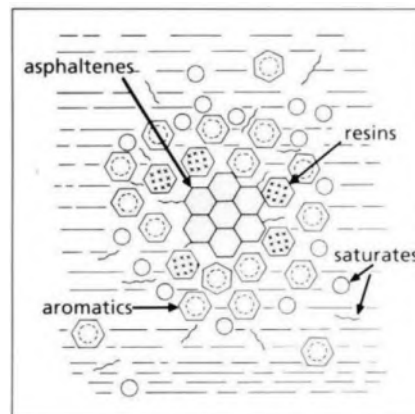


Ilustración 2. Composición del asfalto (Ponce, 2014)

Propiedades físicas del asfalto

Estas propiedades son destinadas generalmente para controlar aspectos de la construcción de carreteras. Ya que es de suma importancia para el diseño, ejecución y mantenimiento de las mismas. De acuerdo con (ARCE, 2007) las clasifica de la siguiente manera:

- *Durabilidad*
Es la medida de que tanto puede retener un asfalto sus características originales cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad

cuantificada principalmente a través del comportamiento del pavimento. Esto debido a que es una propiedad que se afecta por todas las variables, desde el diseño, calidad de los agregados hasta lo hecho en sitio.

- *Adhesión*

Es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación.

- *Cohesión*

Es la capacidad del asfalto de mantener firmemente unidad y en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

- *Susceptibilidad a la temperatura*

Los asfaltos se vuelven más duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta. Es una de las propiedades más valiosas en un asfalto. La susceptibilidad a la temperatura varía entre asfaltos de petróleo de diferente origen, aún si los asfaltos tienen el mismo grado de consistencia.

- *Endurecimiento y envejecimiento*

El endurecimiento es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándolo con el oxígeno), el cual ocurre más fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción) y en películas delgadas de asfalto (como la película que cubre las partículas de agregado).

Clasificación de materiales asfálticos

Los materiales asfálticos son principalmente empleados para la elaboración de pavimentos, sin embargo, también pueden llegar a ser utilizados para impermeabilizantes comerciales y de obras específicas. Pero de acuerdo a la N·CMT·4·05·001/05 los materiales asfálticos se clasifican de la siguiente manera:

- *Cemento Asfáltico*

Son aquellos que previamente se mencionaron del proceso de destilación de petróleo. Una de sus características principales a considerar es la viscosidad dinámica a 60°C. Que nos proporciona la clasificación siguiente donde las siglas **AC** corresponden a las palabras en inglés *Asphalt Cement* seguido de la cantidad de viscosidad en Pa*s.

Tabla 3. Clasificación de los materiales asfálticos (N-CMT-4-05-001, 2005)

Clasificación	Viscosidad a 60° C Pa*s (P ^[1])	Usos más comunes
AC-5	50 ± 10 (500 ± 100)	• Elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 1. • En la elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen para riegos de impregnación de liga, así como en estabilizaciones.

AC-10	100 ± 20 $(1\ 000 \pm 200)$	• Elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 2. • Elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 1.
AC-20	200 ± 40 $(2\ 000 \pm 400)$	• Elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 3. • Elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zona 2.
AC-30	300 ± 60 $(3\ 000 \pm 600)$	• Elaboración de carpetas de mezcla en caliente dentro de las regiones indicadas como Zona 4. • Elaboración de emulsiones asfálticas que se utilicen en carpetas y morteros de mezcla en frío, así como en carpetas por el sistema de riegos, dentro de las regiones indicadas como Zonas 3 y 4. • Elaboración de asfaltos rebajados en general, para utilizarse en carpetas de mezcla en frío, así como en riegos de impregnación.



Ilustración 3. Mapa de clasificación de zonas en la República Mexicana. (N-CMT-4-05-001, 2005)

- **Emulsión asfáltica**

Es el resultado de la combinación que hay entre asfalto y agua. Está dividida en dos fases, una de ellas es continua que está formada por el agua y la discontinua por el cemento asfáltico. La clasificación de las emulsiones asfálticas es la siguiente:

Tabla 4. Clasificación de las emulsiones asfálticas. (N-CMT-4-05-001, 2005)

Clasificación	Contenido de cemento asfáltico en masa %	Tipo	Polaridad
EAR-55	55	Rompimiento rápido	Aniónica
EAR-60	60	Rompimiento rápido	
EAM-60	60	Rompimiento medio	
EAM-65	65	Rompimiento medio	
EAL-55	55	Rompimiento lento	
EAL-60	60	Rompimiento lento	
EAI-60	60	Para impregnación	Catiónica
ECR-60	60	Rompimiento rápido	
ECR-65	65	Rompimiento rápido	
ECR-70	70	Rompimiento rápido	
ECM-65	65	Rompimiento medio	
ECL-65	65	Rompimiento lento	
ECI-60	60	Para impregnación	
ECS-60	60	Sobrestabilizada	

- *Asfaltos rebajados*

Son los que usualmente se emplean para la elaboración de carpetas asfálticas en frío. Están compuestos por dos materiales, el primero es el cemento asfáltico y el segundo el solvente. Y son clasificados de la siguiente manera.

Tabla 5. Clasificación de asfaltos rebajados. (N-CMT-4-05-001, 2005)

Clasificación	Velocidad de fraguado	Tipo de solvente
FR-3	Rápida	Nafta, gasolina
FM-1	Media	Queroseno

Los materiales asfálticos podrían clasificarse de la siguiente manera considerando factores como el uso que tendrá y como será su aplicación.

Tabla 6. Clasificación de materiales asfálticos y sus usos más comunes. (N-CMT-4-05-001, 2005)

Material asfáltico	Vehículo para su aplicación	Usos más comunes
Cemento asfáltico	Calor	Se utiliza en la elaboración en caliente de carpetas, morteros y estabilizaciones, así como elemento base para la fabricación de emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados.
Emulsión asfáltica	Agua	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones.
Asfalto rebajado	Solventes	Se utiliza en la elaboración en frío de carpetas y para la impregnación de subbases y bases hidráulicas.

Clasificación de asfaltos por desempeño

De acuerdo con la N-CMT-4-05-004/18 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte en el 2018, se puede determinar la calidad de cementos asfálticos según su grado de desempeño (PG: Performance Grading). Ya que se encuentran definidos por las temperaturas máximas y mínimas a la que un concreto asfáltico se desempeña de manera correcta. Toda la clasificación de asfaltos comienza con PG (por sus siglas en inglés) seguida de dos números, el primero indica la temperatura en grados Celsius máxima y el segundo la temperatura en Celsius mínima. Con una tolerancia de 6 grados.

- *Asfaltos convencionales*

Los asfaltos convencionales son aquellos que se producen y se extraen directamente del proceso de destilación del petróleo. Son asfaltos que no contienen aditivos modificadores ni en sus propiedades físicas, químicas o reológicas. Su clasificación de grado PG, depende de la zona geográfica donde se ubica la refinería productora. (N-CMT-4-05-004, 2018)

- *Asfaltos modificados*

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación en el asfalto, de un polímero (tipo I, tipo II y tipo III). La implementación de polímeros es utilizada con la finalidad de aportar una mejora en sus propiedades y ofrecer la misma o mejor calidad.

1.1.2 AGREGADOS PÉTREOS

Son materiales granulares sólidos inertes que se emplean en los firmes de las carreteras con o sin adición de elementos activos y con granulometrías adecuadas; se utilizan para la fabricación de productos artificiales resistentes, mediante su mezcla con materiales aglomerantes de activación hidráulica (cementos, cales, etc.) o con ligantes asfálticos (Smith & Collins, 1994).

Tipos de agregados pétreos

Los tipos de agregados se pueden determinar de acuerdo con su procedencia, técnica de empleo y con la clasificación siguiente de acuerdo con (Rodríguez, 2004).

- *Agregados Naturales.*
Son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
- *Agregados de Trituración.*
Se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales.
- *Agregados Artificiales.*
Son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, reutilizables y reciclables.
- *Agregados Marginales.*
Engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes.

Propiedades físicas de los agregados pétreos

De acuerdo con (Rodriguez, 2004) los agregados tienen propiedades macroscópicas físicas en las que se mencionan las siguientes: dimensión, forma, redondez, densidad, propiedades de superficie, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, módulo elástico, conductividad térmica, dilatación.

Propiedades químicas de los agregados pétreos

Las propiedades químicas macroscópicas son solubilidad, alterabilidad, hinchamiento. (Rodriguez, 2004)

Clasificación de los agregados pétreos

En México se puede realizar con base en el sistema SUCS, que por sus siglas en español es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En el que definen como suelos a todos los materiales que tienen partículas de tamaño menor de 7.5 cm o 3". (M-MMP-1-02, 2003)

Tabla 7. Clasificación de suelos con base en el sistema SUCS (M-MMP-1-02, 2003)

Tipo de suelo	Tamaño de partícula	Retención de malla
Suelo grueso (Agregado grueso)	>4.75 mm	Malla N. 4
Suelo fino (Agregado fino)	<4.75 mm	< Malla N.4

1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

1.2.1 COMPOSICIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen diversos factores que influyen en el funcionamiento de una mezcla asfáltica o concreto asfáltico. De acuerdo a la (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2005) son las siguientes:

Naturaleza del cemento asfáltico

La procedencia de un cemento asfáltico y sus condiciones están relacionadas directamente con la susceptibilidad que este puede llegar a tener, considerándolo como un factor influyente en el comportamiento del mismo. Los asfaltos rígidos propician menor variación de temperatura, velocidad y aplicación de carga. Es decir, tiene mayor resistencia a la fatiga. Siendo todo lo contrario para asfaltos blandos, propensas a la deformación permanente.

Contenido de asfalto

Es uno de los parámetros con mayor influencia en el comportamiento de las mezclas asfálticas. Por ello es que se busca y elige un contenido óptimo de asfalto. El asfalto tiene una función ligante dentro de la mezcla asfáltica, debido a que combina y homogeniza a los agregados pétreos. Cuando el porcentaje de asfalto está por debajo del óptimo, la resistencia mecánica y a la fatiga aumentan. Caso contrario cuando se encuentra por encima del porcentaje óptimo, disminuyen las características mecánicas y existe el riesgo de que sufra una deformación permanente.

Porcentaje de vacíos

Muestran la cantidad de vacíos existentes en una mezcla asfáltica ya compacta. Deben existir estos vacíos pues permiten un reacomodo de las partículas que son sometidos a cierta carga. Entre menor sea el porcentaje de vacíos se tiene una mayor vida con respecto a la fatiga, pero este no se debe de sobresaturar de asfalto pues puede causar afectaciones al pavimento asfáltico. Mientras que una cantidad mayor de vacíos permite demasiada entrada de agua y aire a la mezcla comprometiendo su durabilidad.

Granulometría

La curva granulométrica se determina a partir de las características y propiedades de los agregados pétreos empleados y tiene una influencia directa con dos factores: tamaño máximo de agregado y el tipo de curva (continua o discontinua).

Forma y textura del agregado

Tiene relación directa con la compactación. Aquellos con características angulares son más difíciles de compactar a diferencia de aquellos que son redondeados y lisos.

Contenido de finos

Al incorporar agregados finos en las curvas granulométricas nos ayuda a reducir el porcentaje de vacíos, aunque en exceso puede llegar a aumentar el módulo de rigidez.

Temperatura puesta en obra

- *Mezclas asfálticas en caliente*
Es realizada con asfaltos a temperaturas elevadas, alrededor de los 150 grados centígrados, según la viscosidad del ligante, se calientan también los agregados, para que el asfalto no se enfríe al entrar en contacto con ellos.
- *Mezclas asfálticas en frío*
El ligante suele ser una emulsión asfáltica y la puesta en obra se realiza a temperatura ambiente.

1.2.2 TIPOLOGÍA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Mezclas asfálticas en caliente

Es el tipo de mezcla más utilizado en la implementación del asfalto. Donde el proceso de fabricación es calentar el ligante asfáltico y los agregados (con la finalidad de que no enfríen el asfalto), por lo que para su colocación en obra este debe ser a una temperatura mayor al ambiente para no comprometer la calidad requerida.

Existen diversos métodos de diseño para su elaboración algunos de ellos son los siguientes:

- *Método Marshall*
Fue desarrollado en el año 1930, dentro de los principales aspectos a tomar en cuenta son la estabilidad, porcentaje de vacíos y flujo.

Características	Especificación
Propiedades volumétricas	
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta (Marshall)	50
Vacíos de aire (Va); %	4
Vacíos llenos de asfalto (VFA); %	65 - 78
Relación Filler-asfalto (R _{F-Pbe})	0.6 - 1.2
Propiedades de desempeño	
Estabilidad; N (lbf), mínimo	5340 (1200)
Flujo; mm (10 ⁻² in)	2 - 4 (8 - 6)

Ilustración 4. Criterio de diseño de mezclas Marshall (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004)

- *Método Hveem*
Fue desarrollado casi al mismo tiempo que el método Marshall y evalúa la estabilidad pseudotriaxial. (Padilla Rodriguez , 2004)
- *Método AASHTO* (Amaya Alfonso, 2019)
Está basado en los siguientes parámetros para su diseño y ejecución.
 1. Tránsito
 2. Módulo resiliente de la subrasante
 3. Módulos dinámicos de las capas que conforman la estructura del pavimento flexible.
 4. Numero Estructural
 5. Calidad de Drenaje
 6. Nivel de confianza
 7. Porcentaje de error: Desviación estándar
 8. Nivel de servicio
- *Método AAMAS*
Se necesitaban cambios en el diseño, en el que se pudieran evaluar las propiedades volumétricas, identificar las deformaciones permanentes, grietas y la resistencia a bajas temperaturas.
- *Método SUPERPAVE*
Fue basado en el método AAMAS, pues se extiende el diseño volumétrico basado en predicciones de modelos de laboratorio, con el fin de evitar y poder identificar posibles deformaciones. (Padilla Rodriguez , 2004)

Designación Superpave	Tamaño máximo nominal	Tamaño máximo
37,5 mm	37,5	50,0
25,0 mm	25,0	37,5
19,0 mm	19,0	25,0
12,5 mm	12,5	19,0
9,5 mm	9,5	12,5

Ilustración 5. Graduaciones para mezclas SUPERPAVE (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004)

Mezclas asfálticas en frío

Son aquellas mezclas fabricadas a partir de emulsiones asfálticas a temperatura ambiente. Al estar emulsionado en agua el asfalto es menos viscoso lo que hace que sea más fácil de trabajar y compactar. Gracias a su versatilidad con la temperatura, lo hace más fácil de trabajar y que se puedan utilizar una gran variedad de agregados.

1.2.3 EMPLEO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas generalmente son utilizadas para la construcción pavimentos asfálticos que son empleados redes viales, desde carreteras de alta velocidad a vialidades secundarias. Esto debido a la gran capacidad que se tiene de modificar ciertas características que tienen relación con el funcionamiento de los concretos asfálticos.

Mezclas asfálticas en construcción de pavimentos

Existen diversos aspectos a tomar en cuenta a la hora de realizar una carretera o un firme, son cuestiones de acuerdo a las necesidades del proyecto. Algunos pueden ser: La capacidad de carga que necesita tener, qué función tendrá y en qué zona estará. A partir de estas consideraciones de diseño se puede elegir el tipo adecuado.

De acuerdo con (Padilla Rodriguez , 2004) define a los pavimentos como flexibles, rígidos y semirrígidos.

1. Pavimentos flexibles (Base granular)

Están compuestos por capas de sub-base, base de material granular y con una capa de mezcla asfáltica de espesores delgados de hasta 10 cm. regularmente, las capas granulares resisten fundamentalmente la acción del tráfico, la capa de rodadura sirve para impermeabilizar el firme, resistir los efectos abrasivos del tráfico y proporcionar una rodadura cómoda y segura.



Ilustración 6. Capas de un pavimento flexible. (Villaroel, 2016)

2. Pavimentos flexibles (Base asfáltica)

Compuesto por una base y un pavimento asfáltico y el cual está constituido por una capa intermedia y otra de rodadura, la sub-base puede ser granular o con un ligante hidráulico o hidrocarbonado.

3. Pavimentos rígidos (Pavimentos de hormigón)

Están formados por una losa de hormigón colocada directamente sobre la explanada, o sobre una capa de base granular o estabilizada con un hormigón pobre, la losa de hormigón actúa como capa de rodadura.

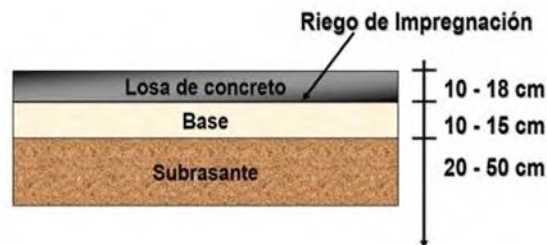


Ilustración 7. Capas de un pavimento rígido. (Giordani & Leone, 2002)

Principalmente el empleo del asfalto solo es para pavimentos flexibles y tienen una funcionalidad directa tanto de los parámetros de construcción como para los usuarios. A través de su intermediario (vehículo). Lo que nos otorgan aspectos funcionales del pavimento descritos por (Padilla Rodriguez , 2004) como:

1. Adherencia del neumático al pavimento
2. Desgaste de los neumáticos
3. Ruido en el exterior e interior del vehículo
4. Comodidad y estabilidad en la marcha
5. Propiedades ópticas
6. Cargas dinámicas del tráfico

1.3 PET (Polietileno de tereftalato)

El polietileno de tereftalato (PET) es un material plástico de alta calidad derivado del petróleo, perteneciente al grupo de los materiales plásticos sintéticos denominados poliésteres concretamente un termoplástico, que se caracteriza por su excelente claridad y brillo, propiedades de resistencia mecánica y barrera a los gases. (PATLÁN, 2007)

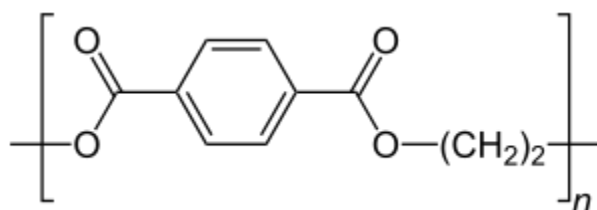


Ilustración 8. Composición química del PET (Plastics Technology México, 2023)

Se considera un polímero al material que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. El PET se puede diferenciar de acuerdo a su aplicación, basada en su peso molecular (Unidades tecnológicas de Santander, 2021). Perteneciente al grupo de los termoplásticos, por ello se puede someter a un proceso de reciclaje.

1.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL PET

Propiedades del PET

El PET posee diversas propiedades, razón por la que se describe su funcionamiento en diversos factores.

Tabla 8. Propiedades del PET (Richardson & Lokensgard, 1999)

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm ³	1.34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	---	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 ⁻⁴ / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120

Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	---	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	Mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	---	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	---	Excelente
Calidad óptica	---	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Tipos de PET

Existen diversos tipos de PET, que se diferencian en cuanto a las propiedades químicas, por ello (PATLÁN, 2007) los clasifica de la siguiente manera:

- PET homopolímero
Es polimerizado en una proporción 1:1 ácido tereftálico (TPA), o dimetil tereftalato (DMT), y etilen glicol (EG).
- PET copolímero
Es polimerizado con un exceso de ácido tereftálico (TPA) no más del 3% mol o 1,4-ciclo-hexanodimetanol arriba del 5% mol y parece ser el material más adecuado en moldeado por soplado de alta velocidad.
- PETG polietilen tereftalato glicol
Es un copolímero obtenido de la polimerización de dimetil tereftalato (DMT) con 15-34% mol de 1,4-ciclo-hexanodimetanol, principalmente usado para tarjetas de crédito. El PETG, presenta un espectro infrarrojo que se diferencia de los otros dos tipos, con una densidad aproximadamente 1.27 g/cm³, una viscosidad mínima de 0.65 dL/g, y una temperatura de transición vítrea (T_g) alrededor de 86 °C. Además, es esencialmente amorfo, y no tiene pico de fusión.

1.3.2 PRESENCIA DEL PET EN MÉXICO

Producción y consumo de PET

México es uno de los países que produce la mayor cantidad de PET (Polietileno de tereftalato), debido a un alto consumo de refrescos y agua embotellada. Tan solo se estima que la producción anual por cada mexicano es de 200 botellas. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2018) . México es el 12° país en el consumo de plásticos. Un mexicano promedio consume 48 kg de plásticos al año. (Ecofiltro, 2022)

El posicionamiento en el mercado de este producto ha sido gracias a su practicidad de almacenamiento y que pese a diversos intentos por la reducción del consumo del mismo a través de campañas de concientización no se ha logrado. Aunque varias empresas han buscado reducir la creación nueva de botellas, a través del reciclaje de sus mismas botellas. Sin embargo, aun así, no se logra cumplir con la demanda que se tiene.



Ilustración 9. Campaña de reciclaje de PET. (ECOCE , 2019)

Reciclaje del PET

En México la cantidad de plásticos representan el 12.88% de los residuos sólidos urbanos, de estos plásticos los principales son el PET y polietileno. (ZOÉ WATER, 2022)

Existen diversos procesos de reciclaje, la finalidad en si es generar un valor económico a partir de los residuos. Buscando también la finalidad de ahorro, sustentabilidad y reparación de ecosistemas. Actualmente existen alrededor de 30 plantas de reciclaje, la más grande PetStar ubicada en Toluca. Quien a su vez está relacionada con Coca Cola, quién es de los mayores productores. (J. Arratibel, 2023) Es necesario realizar una evaluación de la industria del reciclaje, si el beneficio que se tiene es comparable con la demanda de energía, agua y generación de desechos. Ya que México tiene un consumo nacional de resina de PET de aproximadamente 907,000 toneladas al año, que se dividen de la siguiente manera:

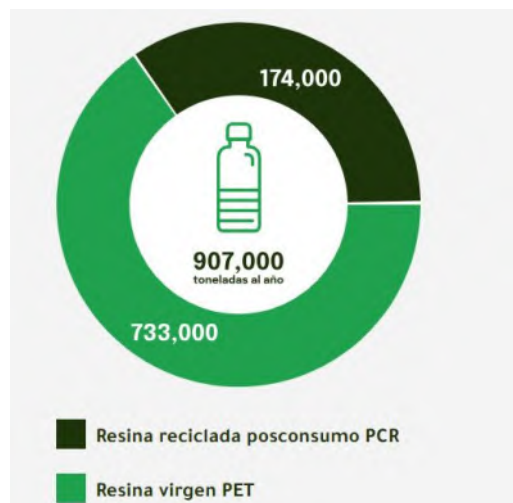


Ilustración 10. Cifras de resinas de PET en México. (ECOCE, 2022)

Donde se denota que a pesar de los esfuerzos de reciclaje aún es la mayoría la resina virgen, es decir, desde 0 para su obtención.

Las tasas de acopio de acuerdo a los últimos años han sido favorables, sin embargo, puede ser un indicador de que la producción sigue incrementando y no decreciendo, por ello es que es bueno reflexionar si se recicla más o si se busca consumir menos.

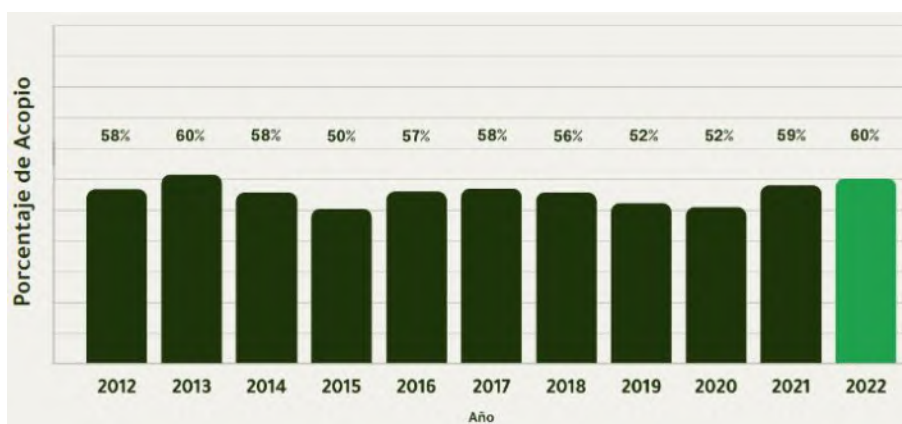


Ilustración 11. Tasas de acopio de PET desde 2012 a 2022. (ECOCE, 2022)

México se ubica dentro de los 5 países que producen más residuos de PET a nivel mundial. Como se muestra en la tabla 9 donde podemos observar cuáles son las principales consecuencias que se generan.

Tabla 9. Residuos de PET anual en diversos países

PAÍS	Residuos PET anual (millones de ton)	Costo de gestión (USD/t)	Principales indicadores de contaminación	Referencia
China	7.5	150-300	Contaminación de ríos (Yangtsé),	(R Jambeck, et al., 2015)

			microplásticos en suelos agrícolas, quema a cielo abierto (CO ₂).	
USA	6.2	200-400	Acumulación en vertederos (40% no reciclado), contaminación costera.	(PNDU, 2022)
India	4.8	80-200	Obstrucción de drenajes, quema informal (emisiones tóxicas).	(United Nations Environment Programme, 2022)
Brasil	3.1	100-250	Contaminación del Amazonas, vertederos ilegales (lixiviados).	(Abipet, 2022)
México	2.5	90-220	Residuos en barrancas urbanas, microplásticos en agua potable.	(SEMARNAT, 2023)

1.4 ANTECEDENTES DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON ADICIONES

La industria de la construcción ha buscado la implementación de diversos materiales que pueden llegar a considerarse residuo. Esto con la finalidad de reducir la contaminación Sin dejar de lado el funcionamiento óptimo de las mezclas con estos materiales, es decir, que sigan cumpliendo con la normativa existente. Ofreciendo una mejora ambiental en su aplicación sin comprometer su eficacia.

1.4.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DIVERSOS TIPOS DE ADICIÓN

a) Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas tibias elaboradas con asfalto modificado con hule de neumáticos pretratado y activado.

En el que se hicieron ensayos de desempeño de mezclas asfálticas de granulometría densa: diseño volumétrico, ensayos de sensibilidad al daño por humedad, deformación permanente, módulo resiliente, módulo dinámico y vida a fatiga. Como resultado se obtuvo que el contenido óptimo de asfalto de mezclas asfálticas tibias de granulometría densa que incorporan hule de neumáticos fue

de 5.6%, el aditivo para mezcla tibia utilizado permitió la elaboración de las mezclas a 135°C y compactación hasta 115°C. (Roa Hernández, 2023)

b) Thermosetting resin modified asphalt: A comprehensive review

Diferentes tipos de asfaltos con resinas termoestabilizantes modificadas tiene un buen comportamiento en el campo directamente en cubiertas de puentes. La viscosidad de estas resinas es demasiada alta por lo que el asfalto pierde su trabajabilidad. (Zhang, et al., 2023)

1.4.2 ADICIÓN DE PET A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

a) Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET)

En este estudio se evalúan las propiedades mecánicas y de fractura, para mezclas que contienen partículas de PET en las mezclas de asfalto. Los tamaños de partícula que se usaron fueron entre la malla No.4 y la malla No.8 en diferentes proporciones como 0, 30, 50, 70 y 100%. Las pruebas a las que fueron sometidos fueron prueba de resistencia a la tracción indirecta (ITS), sensibilidad a la humedad, ensayo de viga semicircular simplemente apoyada (SCB). Los resultados muestran en resumen lo siguiente: Al aumentar la cantidad de PET, el valor de ITS redujo, y se mejoró la resistencia a la humedad. La resistencia a la fractura se redujo cuando la cantidad de 30% y 50% de PET se incluyó en la mezcla. Sin embargo, también se preguntó la probabilidad de fractura. (Shams Esfandabad, Motevalizadeh, Sedghi, Ayar, & Asgharzadeh, 2020)

b) Using waste plastics in road construction

Los resultados de esta investigación arrojaron que al añadir cantidades del 5-10% de plástico en peso al asfalto, incrementan la estabilidad, durabilidad, dureza del concreto asfáltico. Aunque los estudios que se han aplicado a caminos reales tienen alrededor de 10 años, solo han sido aplicadas estas tecnologías en ciertos países como lo son: India, Reino Unido, Países Bajos, Ghana, Etiopía y Sudáfrica. (Sasidharan, Torbaghan, & Burrow, 2019)

c) Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials

Para esta investigación (Movilla Quesada, et al., 2021) realizaron la cuantificación de Metano (CH₄), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Carbono (CO₂) producidos durante la elaboración de mezclas asfálticas y con adiciones. Con la finalidad de obtener una comparación de Gases de

Efecto Invernadero (GHG) de un asfalto convencional y uno con modificación de PET, mediante la técnica de LCI basado en los requerimientos de la ISO 14:040. No se especifica la manera en la que se agrega el PET.

Los resultados arrojan la siguiente comparación de gases de efecto invernadero para la fase de producción y construcción.

Tabla 10. Resultados del análisis de gases de efecto invernadero (Movilla Quesada, et al., 2021)

Gas (kg gas/ton)	Fase de producción		Fase de construcción	
	M1 (0% PET)	M3 (14% PET)	M1 (0% PET)	M3 (14% PET)
CH ₄	4.13	5.02	0.00164	0.00159
CO	0.018	0.019	0.00773	0.00749
CO ₂	1289.61	2966.10	1.53311	1.48604

Se puede observar que en la mayoría de los gases tienen valores similares, no tienen un cambio drástico a excepción del CO₂ en la fase de producción, donde la mezcla con PET tiene un incremento del 109.99% con respecto a la mezcla sin PET.

d) Paving roads with recycled plastics: Microplastic pollution or eco-friendly solution?

En esta investigación (Enfrin, Myszka, & Giustozzi, 2022) evaluaron 2 métodos de implementación de PET en mezclas asfálticas en caliente. En las que consideraron como “método mojado” aquellas mezclas en las que el PET fue añadido dentro del asfalto (bitumen) y como “método seco” en donde se añade el PET como una sustitución de los materiales pétreos o en adición. Considerando que se ha incrementado la implementación de materiales considerados residuos como las botellas de PET, se ha generado una incertidumbre sobre la liberación de micro plásticos al ambiente por las mismas mezclas asfálticas.

Los resultados muestran en tono azul la mezcla con PET como agregado (método seco) y el tono rojo corresponde a la mezcla en la que el PET está dentro del asfalto (método mojado).

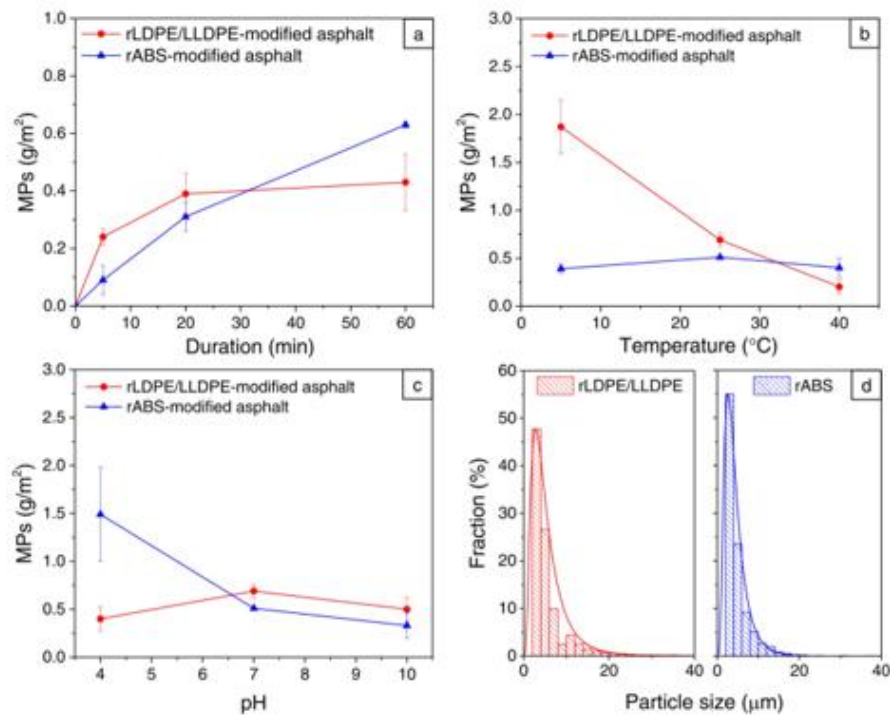


Ilustración 12. Resultados de liberación de micro plásticos en mezclas asfálticas con PET (Enfrin, Myszka, & Giustozzi, 2022)

Se observa un buen comportamiento dentro de las mezclas asfálticas con PET como agregado en temperaturas bajas y altas con baja liberación de Micro-plásticos y de igual manera con un pH neutro con tendencia favorable a lo alcalino. Para la duración mostró valores buenos en los primeros 30 min, pero hay un incremento en los Micro plásticos a los 60 min., y un comportamiento similar entre las dos mezclas para el tamaño de partícula.

e) Investigation of fractionalized polyethylene terephthalate (PET) on the properties of stone mastic Asphalt (SMA) mixture as aggregate replacement

En esta investigación (Ben Zair, et al., 2024) evaluaron mezclas con diferentes porcentajes de PET como agregado fino y como relleno. Desde 0% a 30% por volumen de los agregados. Las mezclas tienen contenidos de asfalto del 4.5 % al 6.5% en aumentos de 0.5%, la forma de las hojuelas de PET hace un mejor enlace con los demás materiales en la mezcla, aumentando el desempeño y durabilidad del pavimento de asfalto. Las mezclas con 10% de PET en adición presentó el 20-22% de aumento en resistencia, obteniendo valores de 3660 y 3989 MPa, además se observó una resistencia al daño por humedad, reduciendo también las deformaciones permanentes.

1.5 GESTIÓN AMBIENTAL

La gestión ambiental es un proceso que tiene como finalidad el orientar, resolver, mitigar y prevenir los problemas de carácter ambiental (Red de desarrollo sostenible de Colombia , 2019). Teniendo como propósito el unir el desarrollo económico y social, sin que se comprometa su patrimonio cultural y biodiversidad. Garantizando de esta manera los beneficios para generaciones presentes y futuras. Considerando esta definición podemos entender que la gestión ambiental es un proceso continuo y de cambios constante de acuerdo a las necesidades que se vayan generando con el tiempo.

La gestión ambiental enfrenta diversos desafíos para lograr integrar el desarrollo económico, justicia social y ofrecer soluciones a estas problemáticas globales.

- a) Pérdida de la biodiversidad
- b) Adaptación y control del cambio climático
- c) Gestión de residuos y contaminación
- d) Urbanización y crecimiento poblacional
- e) Educación ambiental
- f) Gobernanza y políticas públicas con enfoque ambiental

Por ello se apoya de diversas herramientas con las que se trabaja una gestión ambiental que cumpla con las necesidades de cada sector o industria.

HERRAMIENTAS DE LA GESTIÓN AMBIENTAL

Planificación

- Evaluación de impacto ambiental
- Planificación Ambiental

Gestión

- Sistema de gestión ambiental
- Normativas ISO

Monitoreo y evaluación

- Monitoreo Ambiental
- Indicadores ambientales

Participación y comunicación

- Participación pública
- Comunicación ambiental

Tecnología e innovación

- Tecnologías limpias
- Innovación ambiental

Economía y finanzas

- Análisis costo-beneficio
- Economía circular

La finalidad es trabajar en conjunto: sociedad, gobierno y sectores privados. En 2015 las Naciones Unidas establecieron “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible” con la finalidad de crear un plan para lograr un futuro mejor mediante 17 objetivos globales interconectados. También es conocida como Agenda 2030.

1.5.1 ECONOMÍA LINEAL

La economía lineal es el modelo tradicional de nuestro sistema, este último se compone de los siguientes conceptos o pasos. (Morsetto, 2023)

- Extraer
- Producir
- Usar
- Desechar

Generalmente se basa en la idea de que se puede tener un acceso a las materias primas de manera ilimitada, misma en la que no se tiene consideración de consecuencias ambientales. Sin embargo, esto no es viable para una sociedad futura e incluso presente, debido a que la capacidad del ambiente de regenerarse llega a tardar cientos o miles de años, tiempo que no va de la mano de la demanda creciente de la sociedad.



Ilustración 13. Modelo de la economía lineal (Hurtado, 2020)

Principios de la economía lineal

Como se puede observar en la ilustración 13 este modelo se centra en un modelo de producción y consumo constante. Por ello (Hurtado, 2020) menciona los siguientes principios básicos de este modelo:

1. El crecimiento de la economía es permanente
2. El consumo debe de ser constante

Desafíos

El desafío principal de este modelo es que depende de una premisa del acceso infinito a recursos naturales. Además de que no se hace cargo de los residuos que se generan en los procesos. De acuerdo con la (ONU, 2015) y sus datos se sabe que:

1. Si la población mundial llegase a alcanzar los 9600 millones en 2050, se necesitaría el equivalente de casi tres planetas para proporcionar los recursos naturales precisos para mantener el estilo de vida actual.
2. El ser humano está contaminando el agua más rápido de lo que la naturaleza puede reciclar y purificar el agua en los ríos y lagos.
3. Las crisis mundiales provocaron un resurgimiento de las subvenciones a los combustibles fósiles, que casi se duplicaron de 2020 a 2021.

Datos que nos arrojan una perspectiva de cómo este sistema económico está siendo sobrepasado y perjudicando de manera directa al planeta.

Retomando los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU, podemos mencionar el objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles. En el que se busca garantizar una producción y consumo sostenible. Por ello, es necesario buscar un modelo económico que considere factores como el reciclaje, el ambiente y retirarnos un poco de la dependencia de los recursos naturales no renovables.

1.5.2 ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular es un modelo económico relacionado directamente con la manera de producción, uso y disposición de un producto o material.

De acuerdo con el Parlamento Europeo (Parlamento Europeo, 2023) la economía circular es un modelo de producción y consumo que implica el compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido.

Lo cual nos indica de manera general, que se busca principalmente la reducción de los residuos generados y que su ciclo de vida se extienda al poder ser empleados una y otra vez.



Ilustración 14. Modelo de la economía circular (Parlamento Europeo, 2023)

1. Materias primas
2. Diseño sostenible
3. Producción
4. Distribución
5. Consumo, reutilización, reparación
6. Recogida
7. Gestión de residuos – Desechos residuales

Principios de la economía circular

Al hablar de este modelo de economía es importante identificar las oportunidades que trae consigo su aplicación. De acuerdo con el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD, 2018) podemos mencionar los siguientes principios que conforman la economía circular:

1. Durabilidad
2. Sustitución
3. Renovación
4. Modernización
5. Reutilización
6. Reacondicionamiento
7. Reparación
8. Uso reducido de materiales

Es necesario que alguno o varios de estos principios logren implementarse para ir generando la aplicación del modelo de la economía circular.

A manera de resumen se puede observar en el gráfico 1 la información de la economía circular y como se puede generar un aprovechamiento integral. Bajo el concepto de una matriz FODA.



Gráfico 1. Matriz FODA aplicado a la economía circular

2 METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

Para el desarrollo experimental de esta investigación se trabajará con los siguientes materiales:

1. Agregados pétreos (Finos y gruesos)
2. Asfalto PG 64-16
3. Botellas de PET

Metodología de implementación de las botellas de PET

Teniendo en consideración las investigaciones en las que se han realizado una adición o sustitución de PET dentro de una mezcla asfáltica, mencionadas en el apartado 1.4 se realiza el siguiente

análisis para elegir la metodología de trabajo para la obtención de las mezclas asfálticas de esta investigación.

Tabla 11. Comparación de metodologías de incorporación de PET en mezclas asfálticas

Metodologías de incorporación de PET en mezclas asfálticas	
<i>Método seco</i>	<i>Método mojado</i>
Para este proceso el PET es añadido como una adición o sustitución del agregado pétreo (ya sea grueso o fino). La forma del PET puede ser en fibras, hojuelas, polvo o gránulos.	En este proceso el PET es añadido como adición o sustitución del asfalto. Puede ser en forma de polvo, fibras u hojuelas.

El método que se eligió para agregar el PET en la mezcla asfáltica fue el “método seco”, debido a que el objetivo de esta investigación es implementarlo como una sustitución del agregado pétreo. Aunado a ello se propone buscar que tenga una forma lo más similar posible a un agregado pétreo grueso. Ya que se ha visto que la forma de hojuelas, fibras y demás, suelen conglomerarse en ciertas zonas y se busca que la distribución del agregado de PET sea lo más homogénea posible. Considerando esta analogía tendríamos la siguiente clasificación de variables para esta investigación:

Tabla 12. Determinación de las variables de la investigación

Variables	
<i>Independientes</i>	<i>Dependientes</i>
• Porcentaje de sustitución de agregados por agregado de PET • Porcentajes de asfalto a evaluar	• Propiedades volumétricas (Porcentajes de vacíos) • Propiedades mecánicas (Estabilidad y flujo Marshall)

Esta metodología y experimentación tiene un enfoque cuantitativo el tener porcentajes definidos.

2.1.1 AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos serán de la región de Morelia, Michoacán. Exactamente del banco de materiales “Joyitas”. Los cuales deberán de cumplir con los requisitos necesarios para la clasificación de los mismos, ya sea con la implementación de una granulometría densa o abierta. Según lo mostrado en las siguientes ilustraciones.

Granulometría densa

Malla		Tamaño nominal del material pétreo mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (3/8)	12,5 (1/2)	19 (3/4)	25 (1)	37,5 (1 1/2)
Porcentaje que pasa						
50	2"	---	---	---	---	100
37,5	1 1/2"	---	---	---	100	90 - 100
25	1"	---	---	100	90 - 100	76 - 90
19	3/4"	---	100	90 - 100	79 - 92	66 - 83
12,5	1/2"	100	90 - 100	76 - 89	64 - 81	53 - 74
9,5	3/8"	90 - 100	79 - 92	67 - 82	56 - 75	47 - 68
6,3	1/4"	76 - 89	66 - 81	56 - 71	47 - 65	39 - 59
4,75	Nº4	68 - 82	59 - 74	50 - 64	42 - 58	35 - 53
2	Nº10	48 - 64	41 - 55	36 - 46	30 - 42	26 - 38
0,85	Nº20	33 - 49	28 - 42	25 - 35	21 - 31	19 - 28
0,425	Nº40	23 - 37	20 - 32	18 - 27	15 - 24	13 - 21
0,25	Nº60	17 - 29	15 - 25	13 - 21	11 - 19	9 - 16
0,15	Nº100	12 - 21	11 - 18	9 - 16	8 - 14	6 - 12
0,075	Nº200	7 - 10	6 - 9	5 - 8	4 - 7	3 - 6

Ilustración 15. Requisitos de granulometría del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)

Característica	Valor
Densidad relativa, mínimo	2,4
Desgaste de Los Ángeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y lajeadas; %, máximo	35
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

Ilustración 16. Requisitos de calidad del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)

Granulometría abierta

Malla		Porcentaje que pasa	
Abertura mm	Designación	Para espesores ≤ 4 cm	Para espesores > 4 cm
25	1"	--	100
19	3/4"	100	62 - 100
12,5	1/2"	65 - 100	45 - 70
9,5	3/8"	48 - 72	33 - 58
6,3	1/4"	30 - 52	22 - 43
4,75	Nº4	18 - 38	14 - 33
2	Nº10	5 - 19	5 - 19
0,075	Nº200	2 - 4	2 - 4

Ilustración 17. Requisitos granulométricos del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)

Característica ^[1]	Valor
Densidad relativa, mínimo	2.4
Desgaste de Los Angeles; %, máximo	30
Partículas alargadas y ladeadas; %, máximo	25
Equivalente de arena; %, mínimo	50
Pérdida de estabilidad por inmersión en agua; %, máximo	25

[1] El material debe ser 100% producto de trituración de roca sana

Ilustración 18. Requisitos de calidad del material pétreo. (N-CMT-4-04, 2008)

2.1.2 ASFALTO

Se obtuvo este asfalto de la empresa Mega Asfaltos, ubicada en Salamanca Guanajuato. Es de color negro, consistencia semisólida a temperatura ambiente, líquido a temperaturas mayores de 100°C.

ANÁLISIS DEL ASFALTO ORIGINAL			
TIPO DE PRUEBA	RESULTADO	N-CMT-4-05-004/18	NORMATIVA
Recuperación Elástica por Torsión a 25 °C, (%)	N/A	35 min	M-MMP-4-05-024/02
Punto de Inflamación Cleveland (°C)	278	230 min	ASTM D 92
Viscosidad Rotacional 135 °C (Pa-s)	0.510	3 máx	ASTM D 4402
Punto de Reblandecimiento (°C)	53	48 min	ASTM D 36
Separación, Diferencia Anillo y Esfera (°C)	N/A	2 max	ASTM D 7173
Módulo Reológico de Corte Dinámico a 64 °C [G*/sinδ] (KPa)	1.5834	1.0 min	ASTM D 7175
Ángulo de Fase [δ] a 64 °C	81.2	---	ASTM D 7175
Temperatura de Falla (°C)	-	---	ASTM D 7175

Ilustración 19. Ficha técnica de asfalto PG 64-16 (Mega Asfaltos, 2023)

2.1.3 BOTELLAS DE PET

Para obtener el agregado de PET, se necesitarán botellas de plástico como materia prima las que se obtendrán de diversos puntos de acopio: escuelas, centros de trabajo, así como el generado en casa habitación. Para que puedan ser implementados dentro de la experimentación no se requerirá un tratamiento o preparación extra.

Cualquier tipo de botella de PET se podrá incluir, sin importar su estado, limpieza, tamaño, color o antigüedad.

2.2 MÉTODO MARSHALL

De acuerdo al libro de métodos de muestreo y pruebas de materiales M-MMP-4-05-034/23 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte. Se proporciona el siguiente diagrama para su mejor comprensión. En donde se describen que pruebas se necesitan en cada parte del diseño.

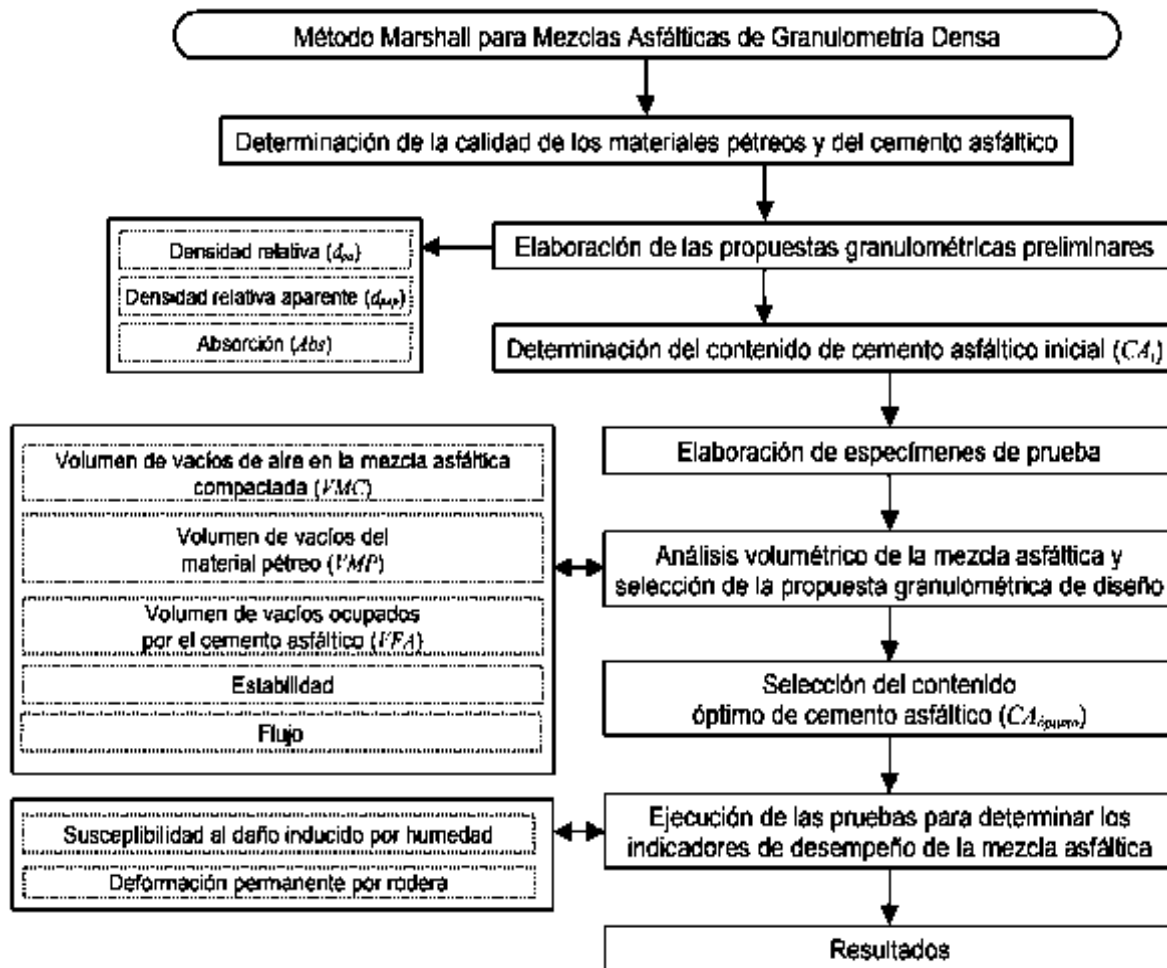


Ilustración 20. Secuencia del método de diseño Marshall. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2016)

Para poder realizar una mezcla bajo el método Marshall en un laboratorio de acuerdo con (Salazar Amaya, Mondragón Ornelas , & Gómez Valdovinos, 2022) los pasos pueden ser los siguientes:

1. Integración de una muestra de material pétreo que cumpla con los requisitos de granulometría para una mezcla densa o abierta, dependiendo el caso.
2. Determinación del contenido mínimo de asfalto para cubrir las partículas del agregado pétreo a utilizar.
3. Elaboración de pastillas con 6 porcentajes de asfalto diferentes (3 pastillas por porcentaje)
4. Determinación de las propiedades volumétricas de las pastillas.
5. Prueba de estabilidad y flujo a las pastillas.

2.2.1 PRUEBAS DE LABORATORIO AL ASFALTO

Las pruebas a las que se someterán las muestras serán:

1. Penetración en cementos asfálticos

2. Viscosidad
3. Ductilidad en cementos asfálticos
4. Punto de reblandecimiento

2.2.2 PRUEBAS DE LABORATORIO A LA MEZCLA ASFÁLTICA

Estabilidad y flujo Marshall (ASTM D6927, 2022)

Indica la capacidad de resistencia a una carga máxima, así como la deformación gradual para una mezcla asfáltica.

3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.4 ASFALTO

Penetración en cementos asfálticos (NMX-C-052-ONNCCE, 2012)

Indica la susceptibilidad térmica del asfalto. Para conocer su dureza y consistencia a cierta carga, temperatura y tiempo.

- **Equipo:**

- Penetrómetro para asfalto
- Baño de agua a 50°C
- Termómetro con capacidad de 0 a 110°C
- Agujas de acero inoxidable
- Cápsulas metálicas o cerámicas
- Cronómetro

- **Procedimiento:**

Del cemento asfáltico con el que se trabajará se toma una porción para calentarla en un recipiente para obtener la fluidez suficiente para el vaciado en el molde o cápsula, cuidando que la temperatura alcanzada no exceda los 130°C.

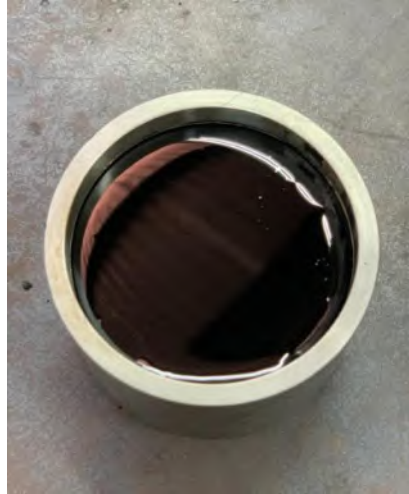


Ilustración 21. Molde con asfalto para la prueba de penetración en cementos asfálticos

1. Se coloca la cápsula de penetración que contiene el asfalto en un baño de agua a 25°C durante 2hrs. Se coloca y nivela el penetrómetro en una superficie plana y se acopla la aguja.
2. La muestra debe quedar bajo la aguja. Por lo que se debe colocar el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro.
3. Se debe hacer coincidir la punta de la aguja con la de la superficie de la muestra, sin tocarlo. Generando un efecto de tipo “espejo”.
4. Al coincidir la manecilla del penetrómetro con el 0 de la caratula, se libera la aguja durante 5 seg y se toma la lectura con aproximación de décimos de milímetro. (Se debe realizar al menos 3 penetraciones).

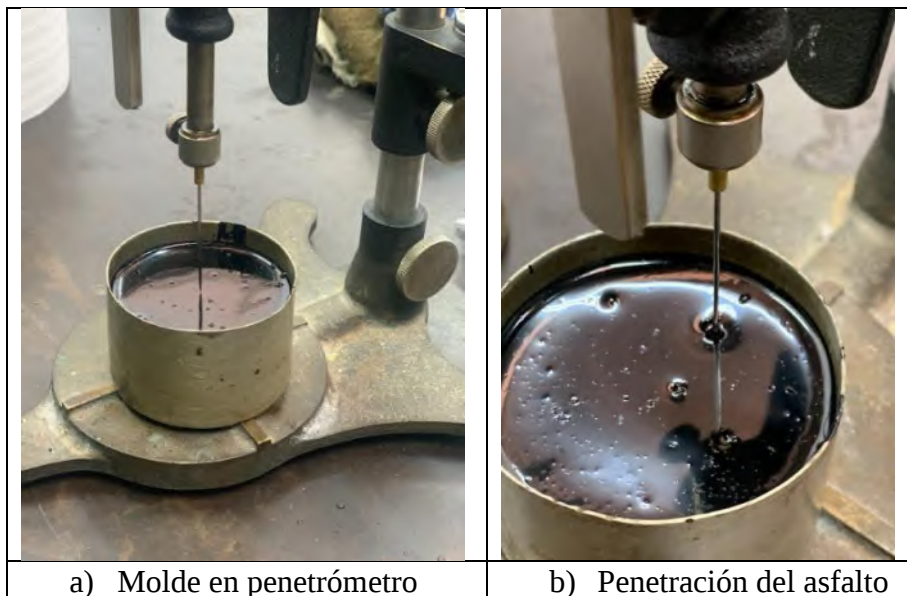


Ilustración 22. Prueba de penetración en cementos asfálticos

-

- **Cálculos y llenado**

El resultado de la prueba es el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja.

Tabla 13. Llenado de la prueba de penetración en cementos asfálticos

Penetración ($\times 10^{-1}$ mm)	Resultado
Lectura 1	Promedio de las lecturas ($\times 10^{-1}$ mm)
Lectura 2	
Lectura 3	

Punto de ignición (Cleveland) (NMX-C-052-ONNCCE, 2012)

Nos ayuda a determinar cuál será la temperatura máxima a la cual podrá ser manejado el asfalto.

- **Equipo:**

- Copa abierta de Cleveland
- Aplicador de flama
- Parrilla eléctrica o mechero
- Termómetro con capacidad de -6 a 400°C
- Soporte de la copa de Cleveland

- **Procedimiento:** (M-MMP-04-05-007, 2000)

Se toma una porción del asfalto para tenerlo en un estado de fluidez suficiente para poder realizar la prueba. No debe exceder los 130°C.

- a) En la copa abierta de Cleveland se vacía el asfalto hasta que la parte superior del menisco llegue a coincidir con la marca de aforo de la misma copa.
- b) Es necesario que el termómetro este colocado en el extremo inferior del bulbo y quede a una distancia de 6.4 mm del fondo de la copa.
- c) Se ajusta el aplicador de flama en búsqueda de que tenga un diámetro de 3 a 5 mm aproximadamente.
- d) Se busca que la temperatura aumente a razón de 14 a 17 °C/min, aplicando calor a la muestra hasta que alcance una temperatura de 60°C aproximadamente.
- e) Reduciendo gradualmente el calor aplicado a la copa, la muestra debe llegar a 30 °C por debajo del punto de inflamación probable, con un incremento de 5 a 6 °C/min.
- f) Se inicia la aplicación de la flama pasándola del lado de la copa y sobre el centro de la misma. Mediante un movimiento uniforme, la duración del paso de la flama debe ser de 1 segundo aproximadamente. Cada que la temperatura de la muestra se eleve 2°C la flama debe aplicarse.

- g) En el momento que se produzca una pequeña flama instantánea o un pequeño destello en cualquier punto de la muestra se registra la temperatura en el termómetro.

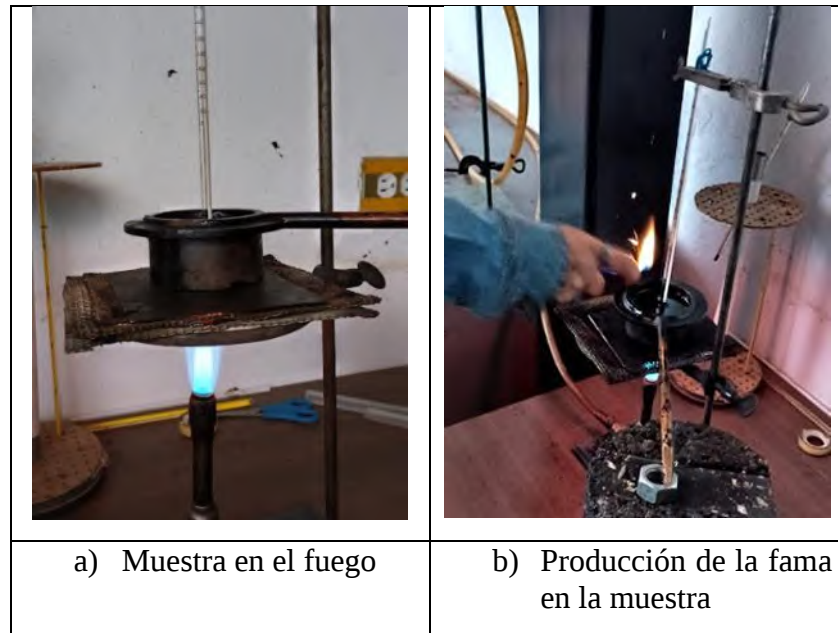


Ilustración 23. Proceso de la prueba de punto de ignición

- **Cálculos y llenado:**

Se toma como resultado el punto de inflamación en °C con aproximación de 2°C a la lectura del termómetro cuando este produce una pequeña flama.

Ductilidad en cementos asfálticos (NMX-C-203-ONNCCE, 2012)

Es la capacidad a la que el asfalto se puede deformar sin presentar alguna falla.

- **Equipo:**

- Ductilómetro
- Placa de apoyo
- Termómetro
- Espátula
- Molde de las briquetas
- Baño de agua maría

- **Procedimiento:**

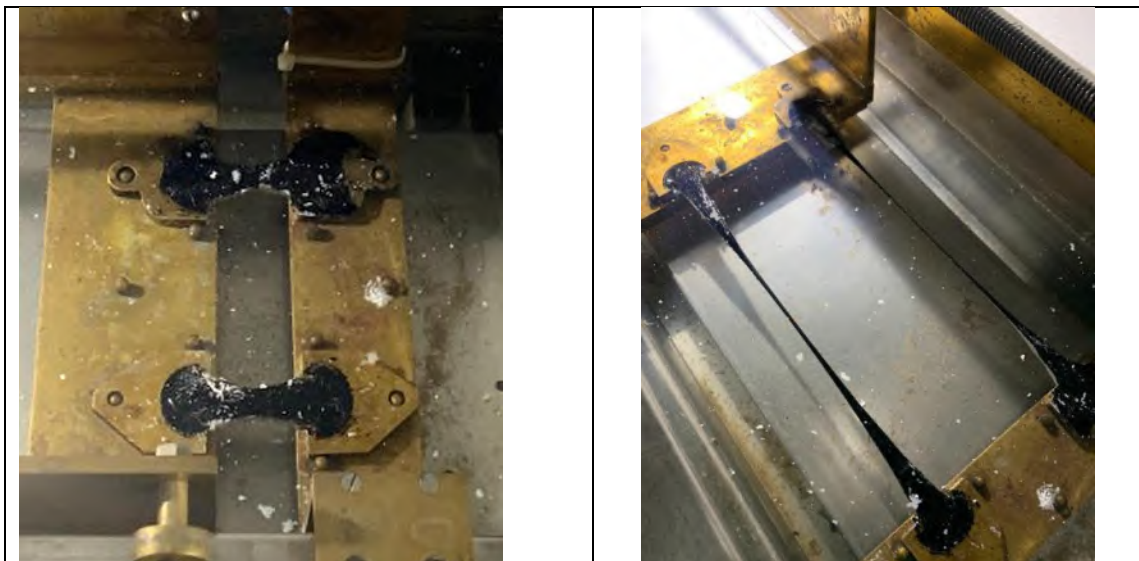
Se coloca un antiadherente a las briquetas para poder colocar el asfalto que estará en un estado de fluidez óptimo para poder realizar el vaciado sobre el molde y la superficie de la placa de apoyo.



Ilustración 24. Preparación del asfalto en los moldes para probar.

Se debe rebasar el límite un poco para enrasarlo al nivel adecuado y no se formen burbujas de aire.

- Se coloca la placa de apoyo con las briquetas en un baño de agua a 25°C durante 90 min. Y se prepara el ductilómetro a 25°C también.
- Hecho esto, se retira la biqueta de la placa de apoyo, para instalarlo en las mordazas del ductilómetro. La biqueta no debe quedar a menos de 2.5 cm de la superficie libre del agua.
- Se pone en marcha el mecanismo de prueba a una velocidad de 5cm/min hasta que se haga la ruptura del material en la biqueta.



a) Muestra en el equipo iniciando prueba	b) Muestra en el equipo un tiempo después
--	---

Ilustración 25. Prueba de ductilidad en asfalto.

- Cálculos y llenado

Se registra como resultado el desplazamiento en cm obtenido al momento de la ruptura del asfalto.

Punto de reblandecimiento (NMX-C-183-ONNCCE, 2012)

Representa la temperatura a la que el asfalto alcanza una consistencia optima y con fluidez.

- Equipo:

- Vaso de vidrio
- Guías
- Pinzas
- Agua destilada
- Estopa
- Esferas de acero de 9.5 mm de diámetro y 3.5 gr de masa
- Termómetro con capacidad de -1 a 175°C (aproximación de 0.5°C)
- 2 anillos de latón
- Sistema de soporte
- Placa de apoyo
- Antiadherente
- Parrilla eléctrica o mechero
- Espátula

- Procedimiento:

Se toma una cantidad de asfalto para que adquiera la fluidez necesaria. Se colocan los anillos sobre la placa de apoyo y el antiadherente. Se vierte el asfalto en los anillos, dejándolos enfriar por 30 min aproximadamente, retirando los excesos.

- a) Se coloca el sistema en el soporte, colocando los anillos con la muestra, las guías y el termómetro, asegurándonos de que esté a nivel de la parte inferior de los anillos, sin tocar el soporte u otra parte.
- b) Si el punto de reblandecimiento es menor a 80 °C se llena el vaso de vidrio a una altura de 10cm con agua potable a 5°C ±1. Durante 15 minutos.
- c) Se monta el equipo en el mechero o parrilla y se incrementa la temperatura uniformemente 5°C/min, con tolerancia de +0.5°C a cada minuto. Después de los 3 minutos.

- d) Se toma la temperatura en el momento en el que el material asfáltico toque la parte inferior del soporte.

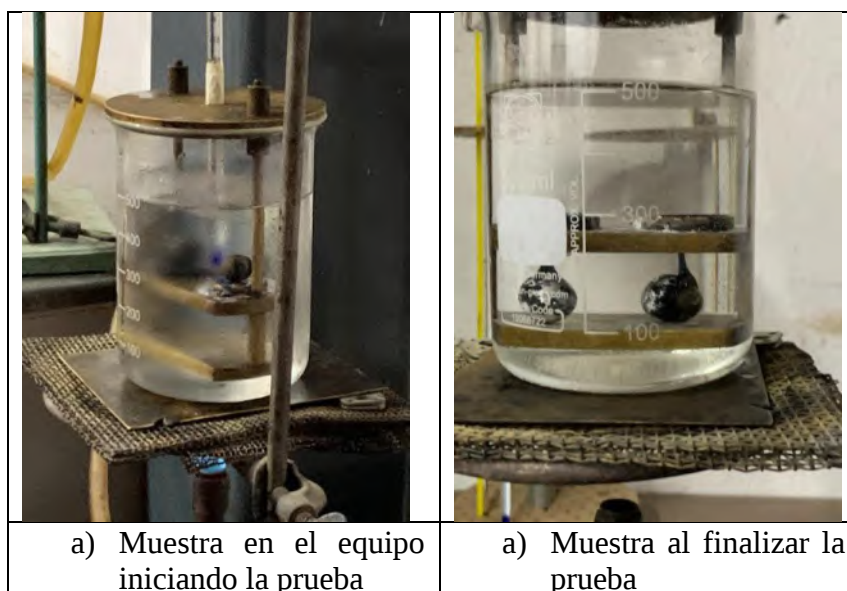


Ilustración 26. Prueba de punto de reblandecimiento en el asfalto

- Cálculos y llenado

El valor que se registra como resultado es la temperatura momento en el que el material asfáltico llegue a la placa inferior del mismo soporte, teniendo una aproximación de 0.5 °C. Estas temperaturas no deben diferir más de 1 °C. De otro modo debe de repetirse la prueba.

3.5 PET

3.5.2 OBTENCIÓN DEL AGREGADO A PARTIR DE PET

Obtención de materia prima

Se obtuvieron las botellas de plástico (PET) mediante campañas de recolección y reciclaje dentro de la universidad y escuelas primarias. El estado de las botellas no tiene demasiada relevancia para el proceso, por ello es que se acepta todo tipo de botella, aun así, estuviera maltratada, con materia orgánica o presencia del producto.

Se trabajó solo con botellas de PET de agua y refrescos. Las partes que fueron retiradas para el proceso fueron la tapa, el recubrimiento de la tapa y la etiqueta (marcadas en el rectángulo azul).



Ilustración 27. Botella de PET y sus partes

Reducción de tamaños

Para facilitar el tratamiento que se realizó era recomendable reducir el tamaño de la botella, por lo que manualmente se realizaron cortes sin un tamaño en específico para obtener una especie de “hojuelas” con las cuales se trabajó.



Ilustración 28. Hojuelas de PET

Tratamiento térmico-mecánico

En este proceso se lleva a cabo la fundición de las “hojuelas” de PET a una temperatura de 250 °C aproximadamente, una vez que se funde y enfría se obtiene un material en estado “bruto”.

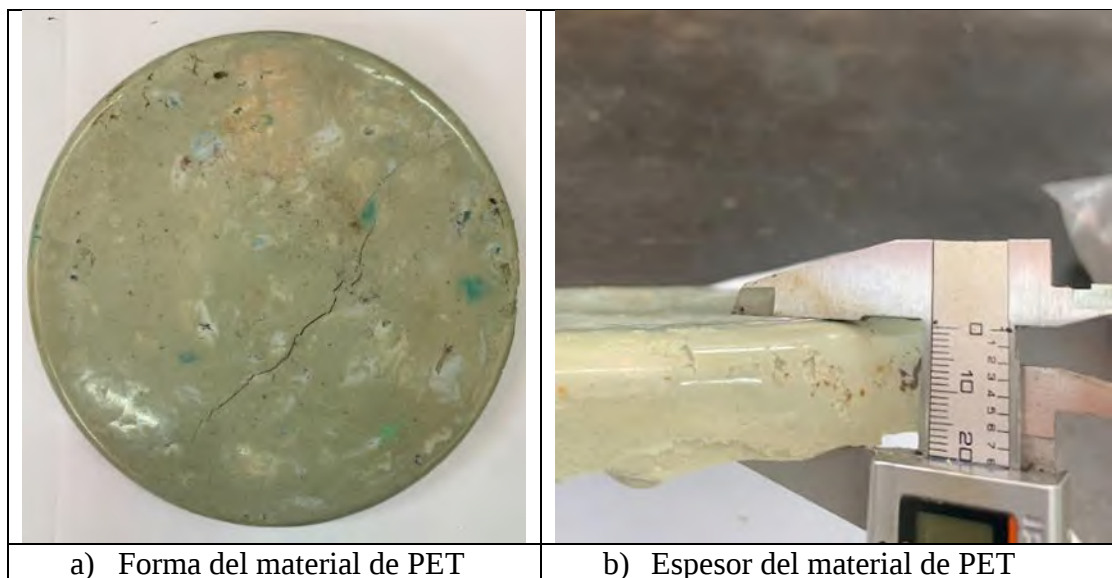


Ilustración 29. Estado bruto del material hecho de PET

Por ello es que después se realiza una reducción de tamaños mediante la tritución del material de manera manual.

Obtención de la granulometría

Como ya se había mencionado la obtención de los tamaños fue manualmente con el apoyo de un martillo. Al realizar la tritución se observaban los tamaños obtenidos y posteriormente se trituraba más o se dejaban de esos tamaños.

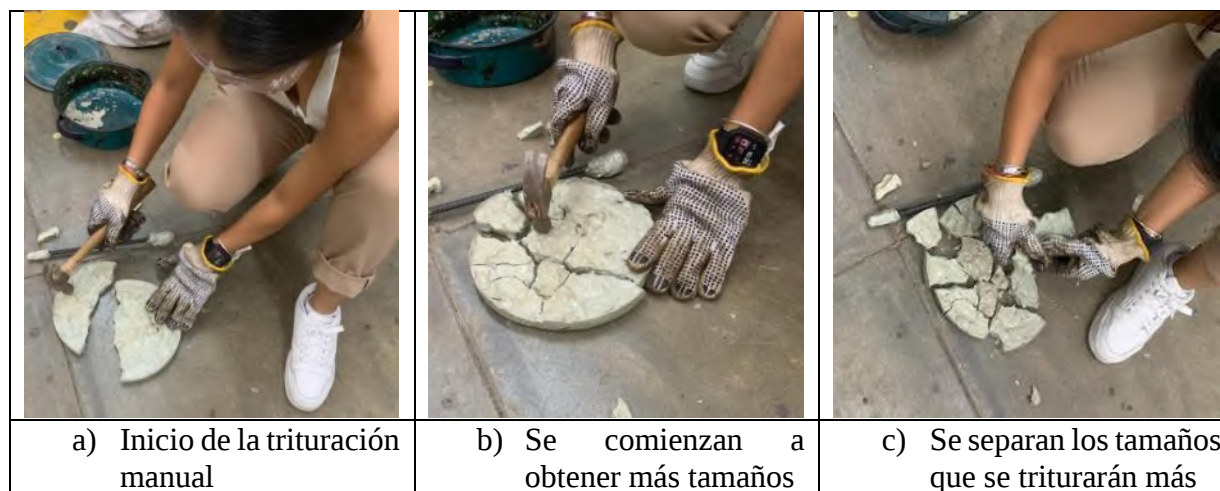


Ilustración 30. Trituración del agregado hecho de PET

3.6 AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos dentro de estas mezclas asfálticas juegan un papel muy importante, ya que representan más del 90% de la mezcla. Por ello, es que su caracterización nos determinará su modo de empleo.

3.6.2 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Cuarteo (M-MMP-4-04-001, 2002)

Equipo:

- Charola
- Cucharon
- Varilla
- Material (fino y grueso)
- Báscula
- Recipientes volumétricos

Procedimiento:

Se apila el material hasta formar un cono mezclando todo el material con ayuda de una pala, para posteriormente dividirlo en 4 partes iguales, se toma el material de los dos cuartos opuestos para llenar el recipiente previamente limpio.

Esto con la finalidad de homogeneizar la muestra y con ella realizar las pruebas correspondientes. Este proceso se realiza para agregados finos y gruesos.

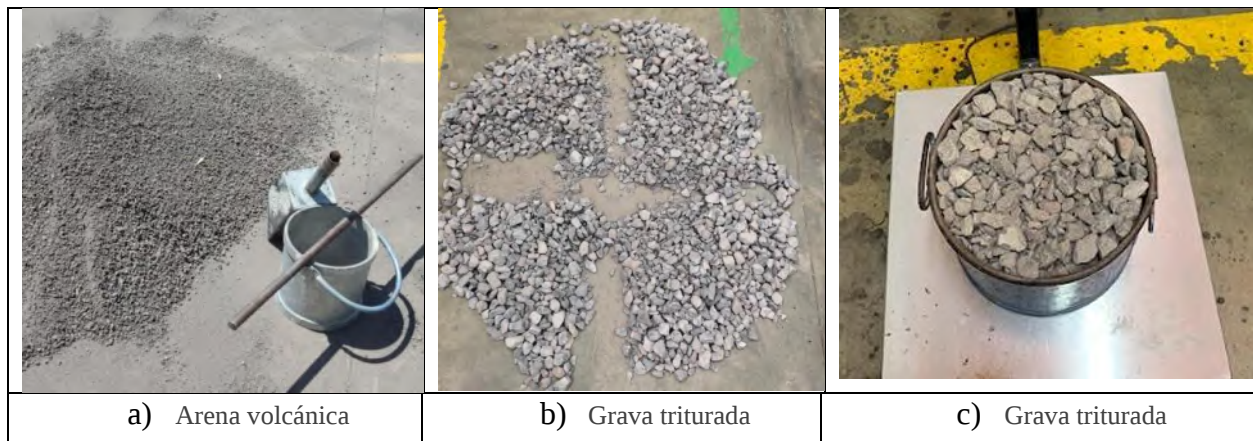


Ilustración 31. Muestreo y cuarteo de materiales pétreos

Granulometrías (N-CMT-4-04, 2008)

De acuerdo con el tipo de mezcla que se vaya a realizar, este nos determina cuáles son las mallas para usar durante el proceso de cribado. Se ensamblan en orden descendente de aberturas, terminando con una charola receptora del material sobrante.

Se puede realizar el cribado de dos maneras; manual y con equipo mecánico.

- **Cribado manual**

Equipo:

- Charola
- Mallas de cribado (Diferentes para grava y arena)
- Cucharón

Procedimiento:

Se colocan las mallas en orden descendente y se toman con la mano para hacer un movimiento uniforme, generando así una agitación continua y se realiza las veces que sea necesario hasta que la mayor parte del material pase de una malla a otra. Se retira el material que queda retenido en cada malla y se pesa con la finalidad de obtener una tabla granulométrica.



Ilustración 32. Cribado manual de agregados gruesos

- **Cribado con equipo mecánico**

Equipo:

- Charola
- Mallas de cribado (Diferentes para grava y arena)
- Cucharón
- Equipo de vibración

Procedimiento:

Se colocan las mallas en orden descendente y se ajusta en el equipo para que se genere una agitación continua en un tiempo determinado por el equipo. Se retira el material que queda retenido en cada malla y se pesa con la finalidad de obtener una tabla granulométrica.



Ilustración 33. Equipo de cribado mecánico del laboratorio.

- Cálculos y llenado de los análisis granulométricos

Tabla 14. Cálculo y llenado de análisis granulométrico para agregados finos

Malla No.	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
4	M4	$R_4 = \frac{M_4}{\sum MRT} * 100$	A4= R4	%P4= 100 -A4
8	M8	$R_8 = \frac{M_8}{\sum MRT} * 100$	A8= A4+R8	%P8 = 100 - A8
16	M16	$R_{16} = \frac{M_{16}}{\sum MRT} * 100$	A16= A8+R16	%P16 = 100 - A16
30	M30	$R_{30} = \frac{M_{30}}{\sum MRT} * 100$	A30= A16+R30	%P30 = 100 -A30
50	M50	$R_{50} = \frac{M_{50}}{\sum MRT} * 100$	A50= A30+R50	%P50 = 100 -A50
100	M100	$R_{100} = \frac{M_{100}}{\sum MRT} * 100$	A100= A50+R100	%P100 =100- A100

200	M200	$R_{200} = \frac{M_{200}}{\sum MRT} * 100$	A200= A100+R200	%P200 = 100 -A200
Charola	MCH	$R_{CH} = \frac{MCH}{\sum MRT} * 100$	ACH= A200+RCH	%PCH = 100 - ACH
Suma	$\Sigma (M4 \dots MCH) =$ (MRT)	$\Sigma (RM\ 4\dots RM\ CH) =100\%$	$\Sigma (A4 \dots ACH) =100\%$	$\Sigma (\%P4 \dots \%PCH) =100\%$

Tabla 15. Llenado y cálculo del análisis granulométrico del agregado grueso

Malla No.	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado	% Que pasa
2”	M2	$R_2 = \frac{M_2}{\sum MRT} * 100$	A2= R2	%P2= A2-100
1 ½”	M1 ½	$R_{1\ 1/2} = \frac{M_{1\ 1/2}}{\sum MRT} * 100$	A1 ½= A2+R1 ½	%P1½ = A1½-100
1”	M1	$R_1 = \frac{M_1}{\sum MRT} * 100$	A1= A1 ½+R1	%P1 = A1-100
¾”	M¾	$R_{3/4} = \frac{M_{3/4}}{\sum MRT} * 100$	A¾= A1+R¾	%P¾ = A¾-100
½”	M½	$R_{1/2} = \frac{M_{1/2}}{\sum MRT} * 100$	A½= A¾+R½	%P½ =100 - A½
3/8”	M 3/8	$R_{3/8} = \frac{M_{3/8}}{\sum MRT} * 100$	A3/8= A½+R3/8	%P3/8 = 100 - A3/8
¼”	M¼	$R_{1/4} = \frac{M_{1/4}}{\sum MRT} * 100$	A¼= A3/8+R¼	%P¼ = 100 - A¼
N° 4	M4	$R_4 = \frac{M_4}{\sum MRT} * 100$	A4= A¼+ R4	%P4 = 100 – A4
Pasa N.º 4	MP4	$RP_4 = \frac{MP_4}{\sum MRT} * 100$	AP4= A4+ RP4	% PP4 = 100- AP4

Suma	$\Sigma (M2 \dots MPA) =$ (MRT)	$\Sigma (R2 \dots RP4) = 100\%$	$\Sigma (A2 \dots AP4) = 100\%$	$\Sigma (\%P2 \dots \%PPA) = 100\%$
-------------	------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Densidades relativas

- Agregado fino

La (NMX-C-165-ONNCCE, 2020) establece el método de ensayo para la determinación de la densidad aplicable a los agregados finos de un tamaño máximo de 4,75 mm (malla No 4).

Equipo:

- Charola metálica
- Espátula
- Parrilla eléctrica
- Vidrio.
- Frasco.
- Muestra representativa (Alrededor de 1 kg)
- Báscula
- Probeta
- Pisón
- Molde tronco cónico

Procedimiento:

1. Es necesario colocar la arena en un periodo de 24 horas a saturar
2. Se coloca en la probeta un volumen de agua conocido (V_i)
3. Se toma una muestra de aproximadamente 300 gr de arena superficialmente seca (Ma)
4. La arena es colocada dentro de la probeta, la cual se debe agitar para expulsar el aire que pueda contener.

Cálculos y llenado

Ecuación 1. Densidad de la arena

$$DA = \frac{Ma}{V_f - V_i}$$

Para el cálculo solo es necesario sustituir los valores correspondientes de la ecuación 1

DA = Densidad de la arena (gr/cm^3).

Ma = Masa de la arena saturada y superficialmente seca (gr).

$V_f - V_i$ = Volumen colocado dentro de la probeta (cm^3).

- Agregado grueso

La norma (NMX-C-164-ONNCCE, 2014) determina la metodología de los agregados con tamaño máximo de hasta 76 mm (3 “). Empleando el método del picnómetro tipo sifón.

Equipo:

- Balanza o báscula
- Parrilla de gas
- Recipiente
- Picnómetro
- Fuente directa de calor
- Probeta graduada.

Procedimiento:

1. El picnómetro se llena con agua permitiendo que el agua fluya por el sifón hasta que deje de gotear.
2. Se determina la masa de la muestra superficialmente seca
3. La salida del sifón se obstruye y se va colocando la muestra poco a poco. Evitando la formación de burbujas al colocarla.
4. Cuando la superficie libre de agua se encuentre en reposo se puede destapar el sifón. Para recolectar el agua en una probeta que se encuentre graduada.

Cálculos y llenado

Ecuación 2. Cálculo de densidades agregados gruesos

$$D_{r,SSS} = \frac{D_{ag}}{D_a} = \frac{\frac{M_{ag,SSS}}{V_a}}{\frac{M_a}{V_a}} = \frac{M_{ag,SSS}}{M_a}$$

Donde:

$D_{r,SSS}$ = Densidad relativa saturada y superficialmente seca (adimensional).

$M_{ag,SSS}$ = Masa de la muestra saturada superficialmente seca en aire (kg).

M_a = Masa del volumen del agua (kg).

- Agregado de PET

Se siguió la misma metodología del aplicado al agregado grueso natural, ya que no existe alguna normativa especial para este tipo de materiales.

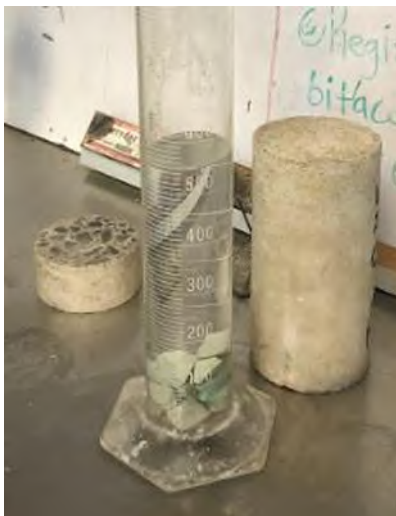


Ilustración 34. Material de PET en la prueba de densidades

Absorción de materiales pétreos

La finalidad es determinar la capacidad máxima de absorción de un agregado, expresándola en porcentaje respecto a su peso seco como se establece en la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2020) y (NMX-C-164-ONNCCE, 2014).

El proceso es el mismo para agregados gruesos y finos teniendo en consideración la diferencia entre los materiales.

- **Equipo:**

- Muestra de grava aproximadamente 1 kg.
- Franela
- Charolas metálicas
- Parrilla eléctrica.
- Espátula.
- Vidrio.
- Balanza o báscula con aproximación al décimo de gramo.

- **Procedimiento:**

1. Se coloca una muestra de 0.5 a 1 kg a saturar en un periodo de 24 horas.
2. La muestra es secada superficialmente, con una cantidad de 300 gr aproximadamente. (Mh)
3. Esta muestra es colocada en una charola para secarla completamente y se verifica la ausencia de humedad, al colocar el vidrio sobre el material, este no debe de empañarse. (Ms)



Ilustración 35. Procedimiento de absorción en agregados

Cálculos y llenado

Ecuación 3. Cálculo de % de absorción

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Partículas lajeadas y alargadas (M-MMP-4-04-005, 2025)

Esta prueba permite determinar el contenido de partículas de formas alargadas y lajeadas presentes en los agregados pétreos empleados en mezclas asfálticas.

- Equipo:

- Calibrador de espesor
- Calibrador de longitudes
- Mallas de cribado (No. 4, ¼", 3/8", ½", ¾", 1", 1 ½", 2")
- Cucharón
- Charolas
- Balanza

- Procedimiento:

Se obtiene una muestra de material retenido en la malla no. 4, misma que contenga más de 200 piezas. Y es la que se somete al cribado. Se registra el número de partículas que se retienen en cada malla y el total final sea mayor a las 200 piezas, de no ser así, deberá de repetirse la prueba.

La masa total de cada una de las muestras obtenidas se designará como M1 y M2.



Ilustración 36. Material en cada malla para realizarle la prueba de partículas alargadas y lajeadas

- Partículas alargadas

Cada pieza del agregado debe pasar por la ranura correspondiente del calibrador de longitudes. Aquellas que no hayan pasado por la ranura se designan como m_a .

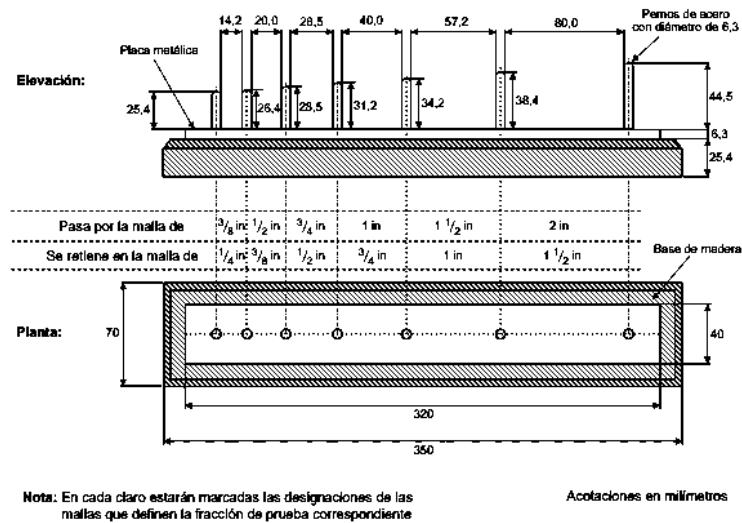
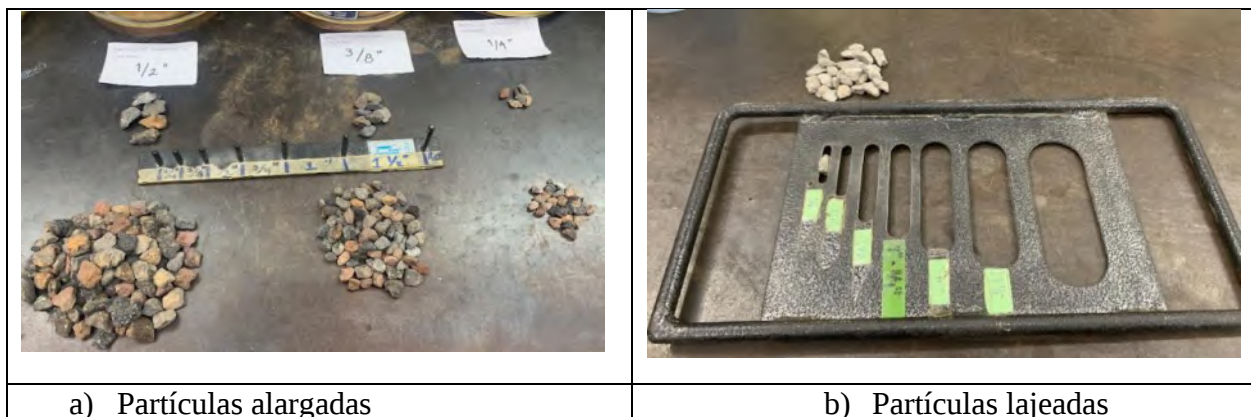


Ilustración 37. Calibrador de longitudes (M-MMP-4-04-005, 2025)



a) Partículas alargadas

b) Partículas lajeadas

Ilustración 38. Prueba de partículas lajeadas y alargadas en el material grueso

- **Partículas lajeadas** (M-MMP-4-04-005, 2025)

A partir del material retenido en las mallas se verifica que el material pase por la ranura del tamaño correspondiente en el calibrador de espesores. La finalidad de la prueba es conocer la cantidad de agregado que tiene una forma aplanada o de laja. El total de la masa que haya pasado las ranuras se conoce como m_e .

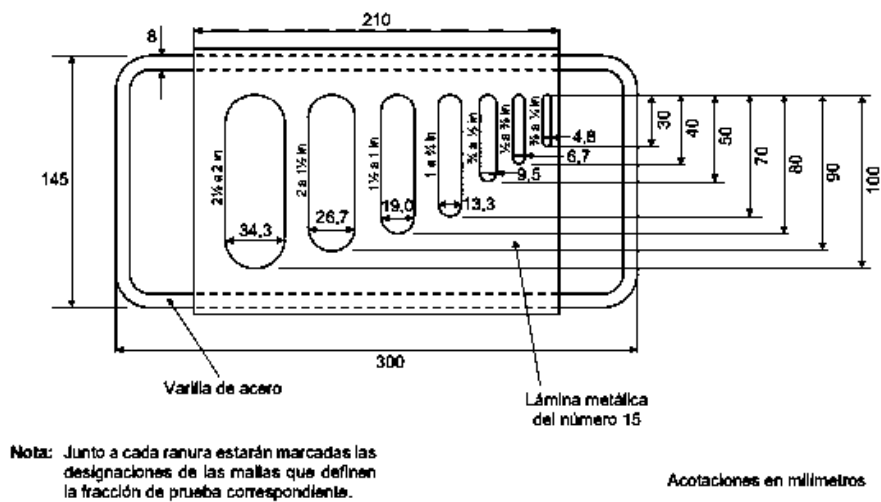


Ilustración 39. Calibrador de espesores (M-MMP-4-04-005, 2025)

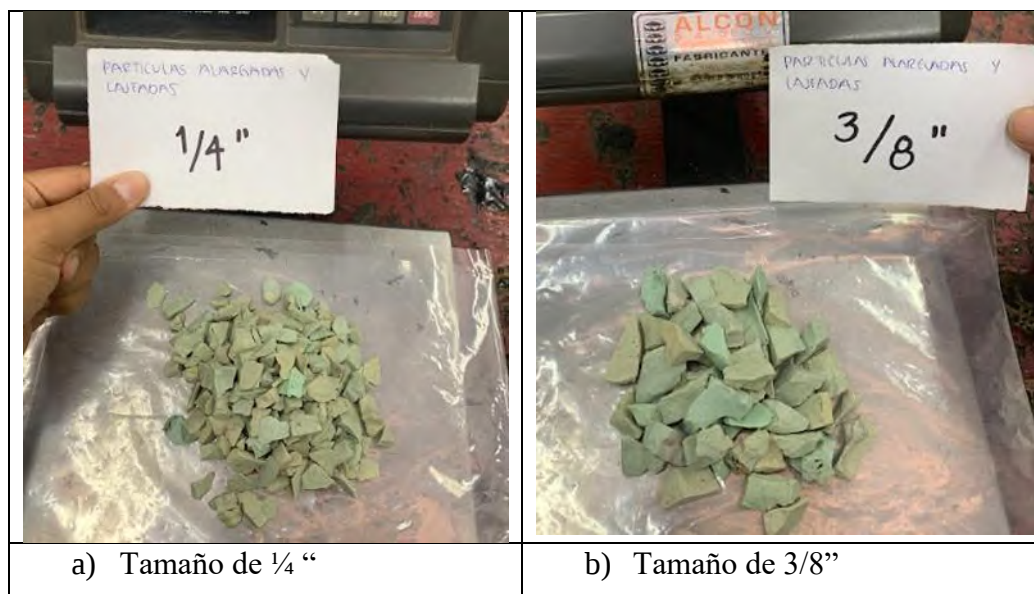


Ilustración 40. Partículas lajeadas y alargadas en los agregados de PET

- Cálculos y llenado

Con relación a la masa de la muestra de prueba, se calcula el porcentaje de las partículas con forma alargada, mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 4. Porcentaje de partículas alargadas

$$C_a = \left(\frac{m_a}{M} \right) * 100$$

Donde:

C_a = Masa de partículas con forma alargada, (%)

m_a = Masa de las partículas con forma alargada (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 ó M_2 (g)

Se calcula el porcentaje de las partículas con forma alargada, con relación a la masa de la muestra de prueba utilizada, empleando la siguiente fórmula:

Ecuación 5. Porcentaje de partículas lajeadas

$$C_p = \left(\frac{m_p}{M} \right) * 100$$

Donde:

C_p = Masa de partículas con forma de laja, (%)

m_p = Masa de las partículas con forma de laja (g)

M = Masa total de la muestra para cada una de las muestras de prueba, es decir, M_1 ó M_2 (g)

3.7 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS: MÉTODO MARSHALL

Este método fue creado por el Ing. Bruce Marshall. Sólo es aplicable exclusivamente a las mezclas asfálticas en caliente. Uno de los aspectos a considerar, es que los agregados deben tener un tamaño máximo de 25 mm (1”) o menor. Es un método que está pensado para su diseño y control en laboratorio.

Para la elaboración de los especímenes de prueba, el método Marshall establece que estos deben tener características como los mostrados en la tabla no. 16

Tabla 16. Medidas de los especímenes para pruebas Marshall (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004)

Tipo de medida	Medida (mm)	Medida (in)
Altura	64	2 ½

Diámetro	102	4
----------	-----	---

Sus aspectos principales para la obtención de resultados son:

- Análisis de sus propiedades volumétricas
- Análisis de las pruebas de estabilidad y flujo

Para la elaboración de los especímenes es necesario considerar para que tipo de tráfico se estará diseñando. Para esta investigación se optará por un tráfico bajo.

Características	Especificación
Propiedades volumétricas	
Compactación; número de golpes en cada cara de la probeta (Marshall)	50
Vacios de aire (Va); %	4
Vacios llenos de asfalto (VFA); %	65 – 78
Relación Filler-asfalto (RF-Pba) ^[1]	0,6 - 1,2
Propiedades de Desempeño	
Estabilidad; N (lbf), mínimo	5340 (1 200)
Flujo; mm (10 ⁻² in) ^[2]	2 – 4 (8 - 16)

Ilustración 41. Requisitos de calidad de mezclas asfálticas para nivel de tránsito bajo ($\Sigma L \leq 1 \times 10^6$), Martillo Marshall. (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2020)

3.7.2 INTEGRACIÓN DE LA MUESTRA

A este proceso se le conoce como integración de la muestra, debido a que la combinación de las granulometrías de los agregados pétreos debe de estar integrada dentro de una curva granulométrica limitada por los tamaños que establece la norma (N-CMT-4-04, 2008).

Malla		Tamaño nominal del material pétreo [1] mm (in)				
Abertura mm	Designación	9,5 (¾)	12,5 (½)	19 (¾)	25 (1)	37,5 (1½)
Porcentaje que pasa (en masa)						
50	2 in	--	--	--	--	100
37,5	1½ in	--	--	--	100	90 - 100
25	1 in	--	--	100	90 - 100	74 - 90
19	¾ in	--	100	90 - 100	79 - 92	62 - 83
12,5	½ in	100	90 - 100	72 - 89	58 - 81	46 - 74
9,5	¾ in	90 - 100	76 - 92	60 - 82	47 - 75	39 - 68
6,3	¼ in	70 - 89	56 - 81	44 - 71	36 - 65	30 - 59
4,75	Nº4	56 - 82	45 - 74	37 - 64	30 - 58	25 - 53
2	Nº10	28 - 64	25 - 55	20 - 46	17 - 42	13 - 38
0,85	Nº20	18 - 49	15 - 42	12 - 35	9 - 31	6 - 28
0,425	Nº40	13 - 37	11 - 32	8 - 27	5 - 24	3 - 21
0,25	Nº60	10 - 29	8 - 25	6 - 21	4 - 19	2 - 16
0,15	Nº100	6 - 21	5 - 18	4 - 16	2 - 14	1 - 12
0,075	Nº200	2 - 10	2 - 9	2 - 8	1 - 7	0 - 6

[1] El tamaño nominal de un material pétreo es la abertura de la malla con la que se designa el material que cumpla con una determinada granulometría.

Ilustración 42. Requisitos de granulometría del material pétreo para mezclas asfálticas de granulometría densa (N-CMT-4-04, 2008)

Graficando estos valores se obtienen la gráfica de los límites de integración de la muestra, es necesario que nuestro diseño esté dentro de ellos para todas las mezclas asfálticas que se realicen.

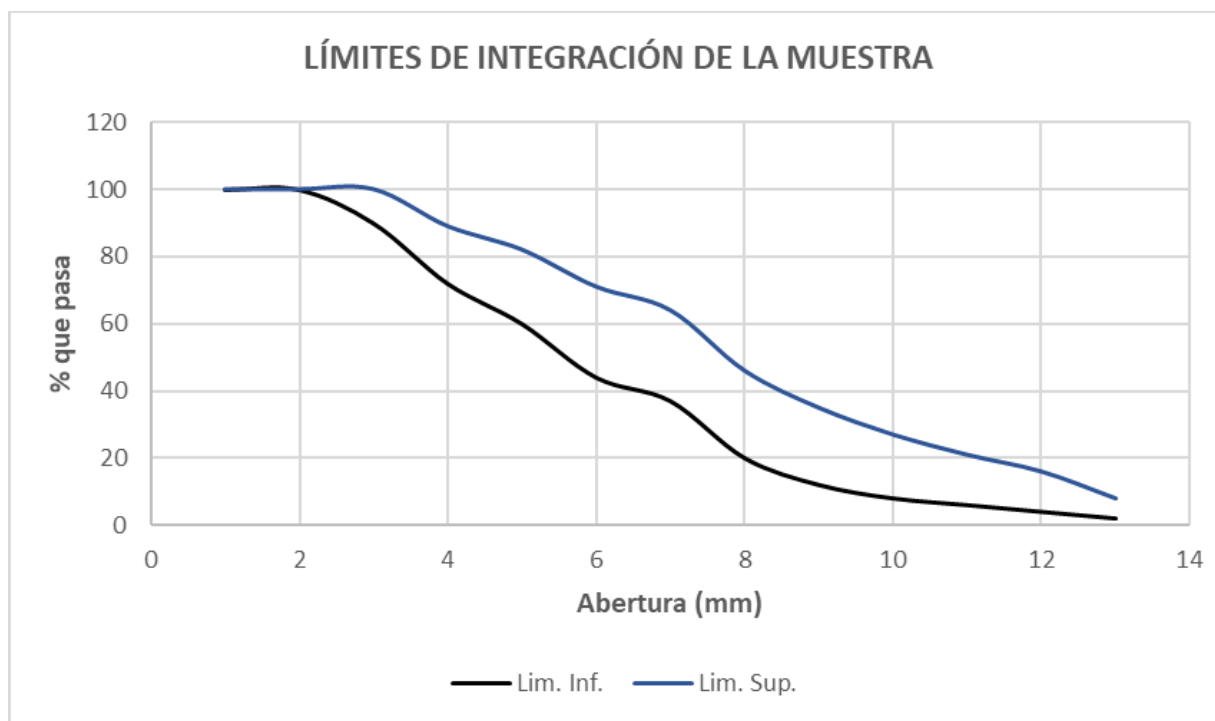


Gráfico 2. Límites granulométricos para la integración de la muestra

En la tabla 17 se muestra el formato con el que se realizarán todos los diseños. Es necesario colocar los datos granulométricos de los agregados pétreos: Arena y grava.

Para posteriormente proponer los porcentajes a trabajar en cuanto a cantidad dentro de la mezcla asfáltica. La finalidad integrar de buena manera los materiales y que se encuentren dentro de los límites establecidos previamente en el gráfico 2.

Tabla 17. Formato de llenado para integración de la muestra MC-0%

% pasa	Mallas	1"	¾"	½"	3/8"	¼"	No. 4	10	20	40	60	100	200
	Grava												
	Arena												
Grava (%)													
Arena (%)													
SUMA													

Para la elaboración de la integración de la muestra de las mezclas con el material de PET con la única diferencia en que se agrega el material de PET que será incluido en esta mezcla en el porcentaje que sea adicionado. Y como se menciona anteriormente los porcentajes elegidos son 5%, 10% o 15% con respecto al volumen del agregado grueso natural.

3.7.3 CONTENIDO MÍNIMO DE ASFALTO

Es la cantidad mínima de asfalto que es requerida para lograr cubrir todas las partículas del agregado pétreo. Se sigue el método analítico que mencionan (Salazar Amaya, Mondragón Ornelas , & Gómez Valdovinos, 2022).

- Procedimiento:

Se deben de conocer las características granulométricas del agregado pétreo fino. Ya que nos indica la cantidad en l/m³ que se necesitan.

- Cálculos y llenado

Ecuación 6. Contenido mínimo de asfalto

$$A = 0.02a + 0.045b + cd$$

Este valor esta expresado como residuo y esta referido al peso del agregado en porcentaje.

Donde los valores corresponden a:

a = % de material retenido en la malla No. 10.

b = % de material que pasa la malla No. 10 y se retiene en la malla No. 200.

c = % de material que pasa la malla No. 200.

d = Coeficiente asfáltico que varía con las características del material, de acuerdo con los datos de la tabla 18.

Tabla 18. Coeficiente asfáltico, según las características del material (Salazar Amaya, Mondragón Ornelas , & Gómez Valdovinos, 2022)

Material	Índice asfáltico
Gravas o arenas de río o materiales redondeados de baja absorción	0.15
Gravas trituradas de baja absorción	0.20
Gravas trituradas de media absorción	0.30
Rocas trituradas de alta absorción	0.35

3.7.4 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES

A los especímenes para pruebas Marshall, generalmente se les conoce como “pastillas” por la forma que poseen. Su elaboración es a partir de los resultados de la integración de la muestra, además del contenido mínimo de asfalto. El procedimiento para la elaboración generalmente se conforma de los siguientes pasos:

- Mezclas a realizar
- Porcentajes de asfalto a evaluar
- Determinación los porcentajes a trabajar para cada agregado de la mezcla asfáltica
- Elaboración de los especímenes Marshall (pastillas)

Mezclas a realizar

Para esta investigación se optó por la elaboración de 4 mezclas para evaluar el comportamiento mecánico del agregado de PET dentro de cada una de las mezclas asfálticas. Además de contar con una mezcla convencional. En la tabla 19 se establece la nomenclatura de las mezclas y sus propiedades correspondientes.

Tabla 19. Mezclas asfálticas a realizar

Nombre de la mezcla	Propiedades de la mezcla
MC-0%	Mezcla control con 0% de PET
MP-5%	Mezcla con 5% de PET
MP-10%	Mezcla con 10% de PET
MP-15%	Mezcla con 15% de PET

Porcentajes de asfalto a evaluar

Una vez que se conoce el valor mínimo de asfalto. Se pueden proponer diferentes porcentajes a evaluar y conocer su comportamiento. Tomando como consideración una variación de $\pm 0.5\%$ en la cantidad de asfalto.

Sen la tabla 20 se proponen los siguientes porcentajes para la elaboración de las mezclas asfálticas.

Tabla 20. Porcentajes de asfalto para la elaboración de mezclas asfálticas

No. de porcentajes	1	2	3	4	5	6
% de asfalto	4%	4.5%	5%	5.5%	6%	6.5%

Determinación de la cantidad de agregados de la mezcla asfáltica

La cantidad de agregados pétreos con la que se trabajará para la elaboración de pastillas, será una muestra total de 980 gr., debido a las características del material pétreo. Y buscando que cumpla con las medidas específicas del espécimen Marshall. Para determinar las cantidades exactas del material existen 2 metodologías.

- Cantidad por mallas

Para esta metodología se trabajará con la granulometría de los agregados finos y gruesos pétreos o de PET. Y se calcula individualmente la cantidad del material que se requiere de cada malla con respecto a la cantidad de la muestra total. Como se muestra en la tabla

Tabla 21. Formato para la cantidad de agregados por mallas

Mallas		% de material total	Cantidad total de la muestra (g)	Material parcial (g)
Pasa	Retiene			
1"	3/4"		980	
3/4"	1/2"			
1/2"	3/8"			
3/8"	1/4"			
1/4"	No. 4			
4	10			
10	20			
20	40			
40	60			
60	100			

100	200		
200	Charola		
			Suma

- Porcentaje del material

Para esta metodología el proceso se simplifica. Se trabaja con la cantidad en porcentaje que resulto de la integración de la muestra para los agregados pétreos que representan el total de la muestra.

Tabla 22. Formato para la cantidad de agregados por porcentaje (Mezcla control)

Material	% material	Cantidad total de la muestra (gr)	Material (gr)
Grava	Integración de la muestra	980	
Arena	Integración de la muestra		
		Suma	

Para la mezcla con agregado de PET se debe considerar el porcentaje de sustitución. Ya sea del 5%, 10% o 15% con respecto al agregado grueso. Y de la cantidad total de la muestra.

Tabla 23. Formato para la cantidad de agregados por porcentaje (Mezclas de PET)

Material	% material	Cantidad total de la muestra (gr)	Material (gr)
Grava	Integración de la muestra	980	
Arena	Integración de la muestra		
PET	Integración de la muestra		
		Suma	

Elaboración de los especímenes Marshall (pastillas)

Con la finalidad de obtener resultados lo más controlados posibles, se deben realizar 3 pastillas por contenido de asfalto. Una vez conocidos los valores de asfalto y las cantidades de los agregados pétreos se pueden realizar los especímenes. Esto se debe realizar por cada mezcla.

Tabla 24. Resumen de mezclas y especímenes

Mezcla	Porcentajes de asfalto	No. de especímenes	Total de pastillas
MC-0%	6	3	18
MP-5%	6	3	18
MP-10%	6	3	18
MP-15%	6	3	18
Total de pastillas a evaluar			72

Dándonos los siguientes formatos de elaboración para las 2 metodologías de la determinación del agregado.

- Elaboración de pastillas por mallas

Para este formato se trabaja con los valores previamente obtenidos de la determinación del agregado. Las variaciones y cálculos que se realizan son con respecto al porcentaje de asfalto. Con estos datos se busca realizar 3 pastillas.

Tabla 25. Formato de elaboración de pastillas por determinación del agregado por malla

Malla	Porcentaje de asfalto	Masa del material (gr)	Masa del asfalto (gr)	Masa total (gr)
3/4"	% asf	M1	$MA1 = \% asf * M1$	M1+MA1
½ "		M2	$MA2 = \% asf * M2$	M2 + MA2
3/8"		M3	$MA3 = \% asf * M3$	M3 + MA3
¼"		M4	$MA4 = \% asf * M4$	M4 + MA4
No. 4		M5	$MA5 = \% asf * M5$	M5 + MA5
10		M6	$MA6 = \% asf * M6$	M6 + MA6
20		M7	$MA7 = \% asf * M7$	M7 + MA7
4		M8	$MA8 = \% asf * M8$	M8 + MA8
60		M9	$MA9 = \% asf * M9$	M9 + MA9
100		M10	$MA10 = \% asf * M10$	M10 + MA10
200		M11	$MA11 = \% asf * M11$	M11 + MA11
Suma				

- Elaboración de pastillas por porcentaje

Para este proceso solo se deben conocer las masas de los agregados con los que se trabajarán. Se realiza la sumatoria correspondiente con respecto al porcentaje de asfalto a trabajar para la elaboración de 3 especímenes.

Tabla 26. Formato de elaboración de pastillas por porcentaje de agregado

Porcentaje de asfalto	Masa de la grava (gr)	Masa de la arena (gr)	Masa del asfalto (gr)	Masa total (gr)
% asf	MG	MAR	$MA = \% asf * (MG + MAR)$	MG+MAR+MA

La variación de este formato cambiaría añadiendo el material de PET dentro de la tabla, la sumatoria considerada para el cálculo de la masa del asfalto y la masa total.

- **Equipo:**

- Parrilla
- Charolas
- Báscula
- Recipiente para calentar asfalto
- Guantes y lentes de protección
- Termómetro digital
- Horno
- Moldes de especímenes Marshall
- Equipo con martillo Marshall

- **Procedimiento**

Para la elaboración de los especímenes Marshall el procedimiento es el mismo para cualquiera de las dos metodologías.

- Se pesa la cantidad necesaria de cada material pétreo
- El agregado pétreo grueso debe calentarse en la parrilla a una temperatura de 130°C a 150°C, simultáneamente en otra charola el agregado pétreo fino debe de hacer el mismo proceso.
- Cuando el asfalto está en condiciones óptimas de temperatura y manejabilidad, se pesa la masa del mismo para agregarlo al agregado pétreo grueso caliente.
- Se mezcla el agregado grueso con el asfalto, hasta que todas las partículas estén cubiertas completamente con el asfalto. Posteriormente se coloca el agregado fino hasta que se observe una mezcla homogénea de los materiales. Cuidando la temperatura en todo momento.
- Dicha mezcla se vierte en los moldes de especímenes Marshall que previamente estuvieron en el horno.
- Estos moldes son colocados en el equipo compactador con el martillo Marshall y se dan 50 golpes por cara.
- La pastilla debe dejarse enfriar 60 minutos para desmoldarlas.

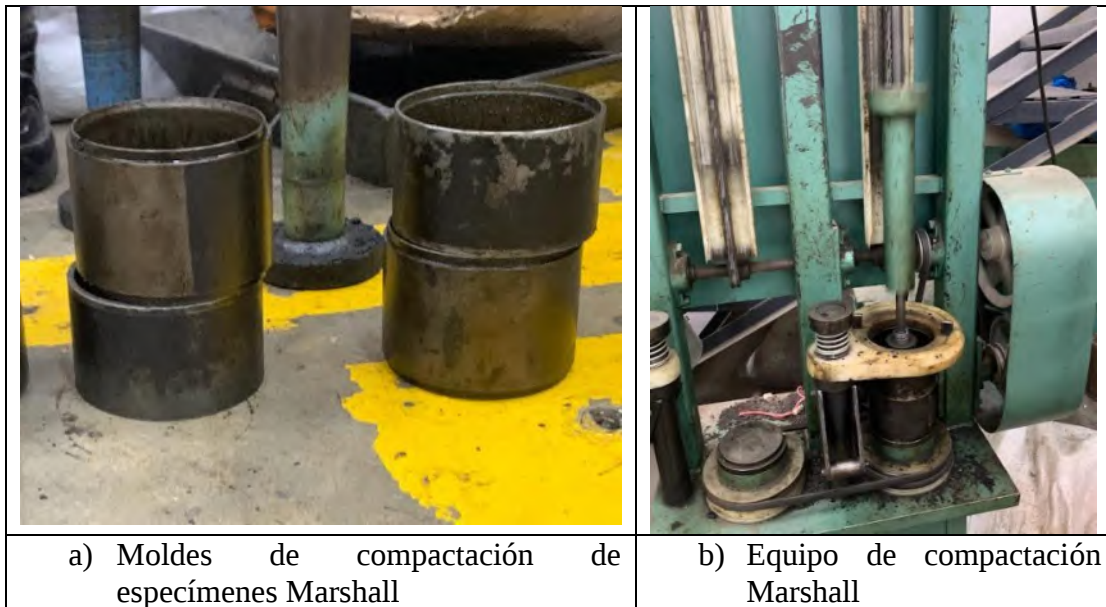


Ilustración 43. Equipo necesario para elaboración de especímenes Marshall.

3.7.5 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LOS ESPECÍMENES MARSHALL

Las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica determinan los valores que son necesarios para conocer la densidad del espécimen y conocer la escritura interna de la mezcla asfáltica ya compactada.

- **Equipo:**

- Vernier
- Balanza
- Canastilla
- Franela
- Espátulas
- Parafina

- **Procedimiento:**

- Se mide el diámetro y altura de la pastilla, considerando 3 punto de referencia diferentes para obtener un promedio.
- Se pesa la pastilla en su estado original y se determina como *masa del espécimen sin parafina en aire*.
- Posteriormente se le coloca la parafina en estado fluido para recubrir todos los poros que llegase a tener la pastilla. Se pesa una vez enfriado y recubierto totalmente por lo que se determina como *masa del espécimen con parafina en aire*.

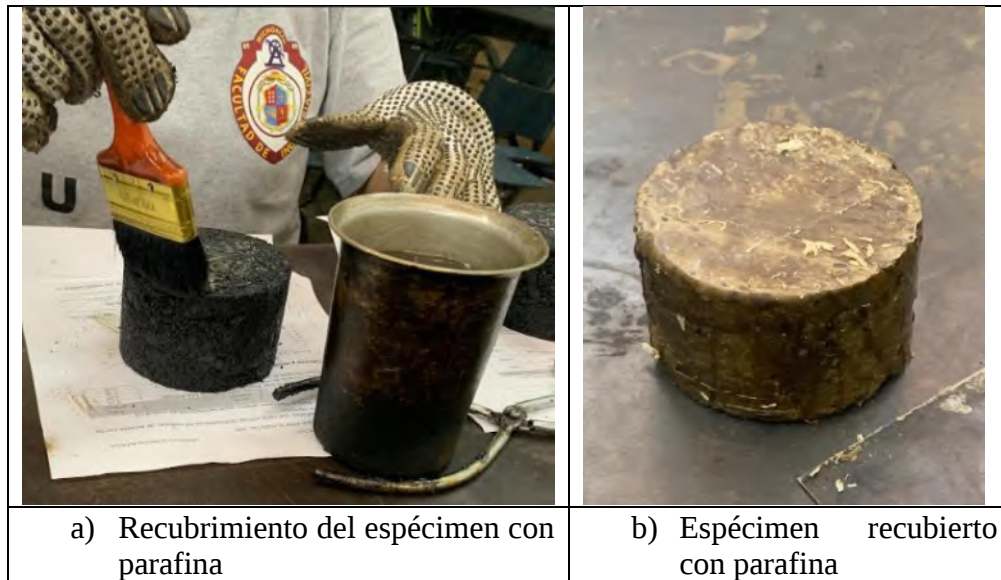


Ilustración 44. Preparación de la muestra con parafina

- Posteriormente se trabaja con la canastilla a la que se le determina su masa, se coloca la canastilla dentro del agua y en ella se coloca la pastilla con parafina asegurándonos que esté completamente sumergida.
- Ahora se toma la masa de la pastilla sumergida más la masa de la canastilla y se determina como *pastilla con parafina sumergida*.

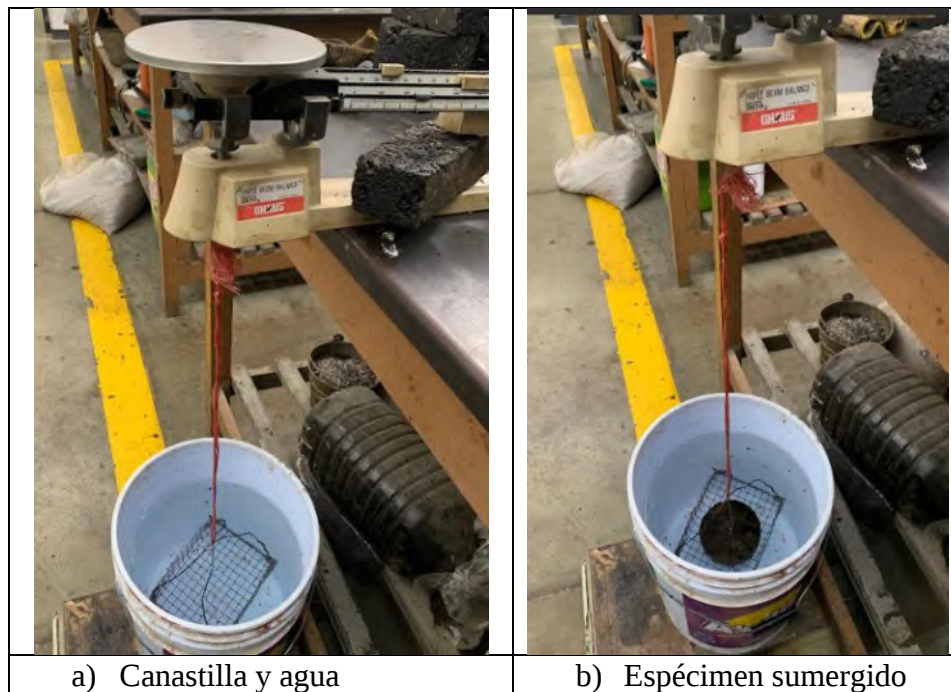


Ilustración 45. Realización de la prueba de propiedades volumétricas

Por lo que para cada porcentaje de asfalto se obtiene el siguiente formato de datos.

Tabla 27. Formato de llenado para propiedades volumétricas de las pastillas

Mezcla	% asfalto	Espécimen	Promedio de diámetro (mm)	Promedio de altura (mm)	Masa canastilla (gr)	Masa del espécimen sin parafina en aire (gr)	Masa del espécimen con parafina en aire (gr)	Pastilla con parafina sumergida (gr)
		1						
		2						
		3						

3.7.6 ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

De acuerdo con la (Secretaría de Comunicaciones y Transporte, 2004) se debe de desarrollar la prueba después de determinar las propiedades volumétricas.

- **Equipo:**

- Baño María
- Prensa Marshall

- **Procedimiento:**

- Se colocan las pastillas en baño maría a una temperatura de 60°C durante un tiempo de 30-40 minutos.
- Transcurrido el tiempo se coloca en el equipo de mordazas, para colocarlo en la prensa Marshall.
- Se aplica la carga hasta la falla. Donde se registra la carga máxima y deformación en el punto de falla.

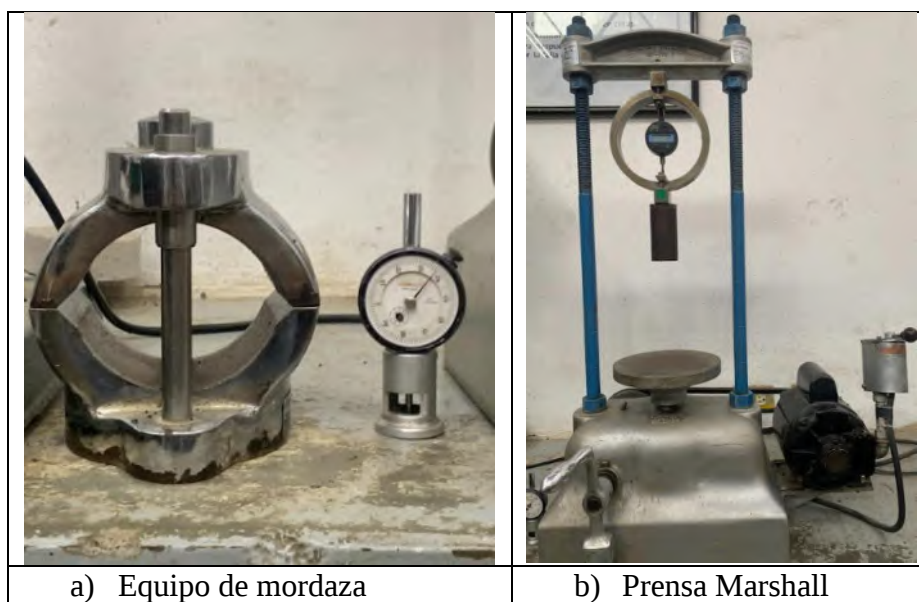


Ilustración 46. Preparación del equipo para la prueba de estabilidad y flujo Marshall.

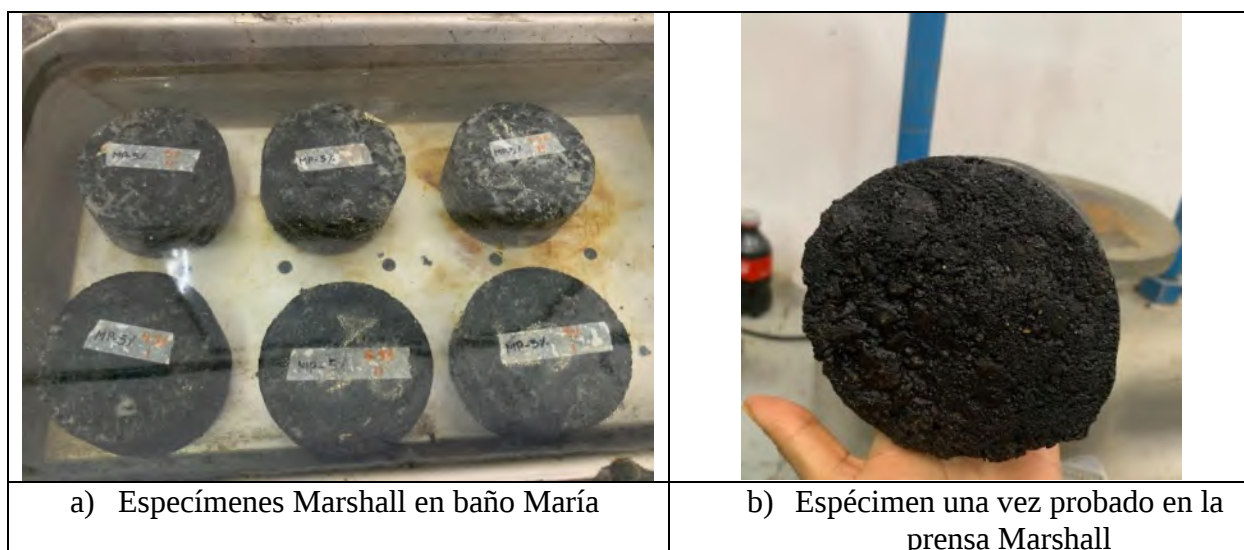


Ilustración 47. Especímenes en baño María y probado en la prensa

4 RESULTADOS

4.4 ASFALTO

Penetración en cementos asfálticos

La prueba arrojó los siguientes datos, después de generar 2 promedios para las pruebas.

Tabla 28. Resultado de la prueba de penetración en cementos asfálticos

Lectura	Penetración	Unidad
Promedio 1	53.67	$\times 10^{-1} \text{mm}$
Promedio 2	55.33	$\times 10^{-1} \text{mm}$

En relación con lo mencionado en el manual (M-MMP-4-05-006, 2000), la prueba cumple ya que no se tiene una diferencia de ± 4 unidades entre sí.

Punto de ignición (Cleveland)

Teniendo en consideración lo establecido en el (M-MMP-04-05-007, 2000), los resultados mostrados en la tabla 29 cumplen, ya que la diferencia no debe de ser de $\pm 2^\circ\text{C}$ entre sí.

Tabla 29. Resultados de la prueba de punto de ignición en asfalto

Lectura	Temperatura
1	247°C
2	245°C
Promedio	246°C

Ductilidad en cementos asfálticos

El ensayo de esta prueba se realizó con lo establecido en la norma, el manual (M-MMP-4-05-011, 2007) establece que se debe tomar como resultado el valor que muestra la longitud que se desplazó la mordaza hasta una ruptura del asfalto contenido en la briqueta.

Sin embargo, con la longitud que tiene el equipo de prueba que existe en el laboratorio no cuenta con la longitud necesaria para generar la ruptura del asfalto. Solamente tocó el fondo en su parte más delgada. Se reporta que el asfalto a trabajar tiene una ductilidad mayor a los 150 cm del equipo.



Ilustración 48. Asfalto al término de la prueba de ductilidad

Punto de reblandecimiento

La realización de esta prueba nos arrojó los resultados mostrados en la tabla 30

Tabla 30. Resultados de la prueba de punto de reblandecimiento

Lectura	Temperatura
1	47°C
2	47°C
Promedio	47°C

Dichos valores cumplen, ya que los límites establecidos en el (M-MMP-4-05-009, 2000) indican que no debe existir una diferencia de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ entre sí.

4.5 PET

Agregado hecho a partir de PET

No existe una norma o manual que nos indique el proceso de realización o algún dato para comparar lo obtenido. Solo se muestra el agregado hecho a partir de PET con las diferentes granulometrías requeridas para el diseño.



Ilustración 49. Granulometría del agregado hecho de PET

4.6 AGREGADOS PÉTREOS

Densidades relativas

Tabla 31. Resumen de resultados de las densidades de los materiales

Material	Densidad
Agregado grueso natural triturado	2.64
Arena volcánica	2.36
Agregado grueso de PET	1.24

Absorción de materiales pétreos

Tabla 32. Resumen de resultados de % de absorción

Material	Absorción
Agregado grueso natural triturado	2.74 %
Arena volcánica	10.46 %

Granulometría agregado fino

GRANULOMETRÍA EN AGREGADOS FINOS

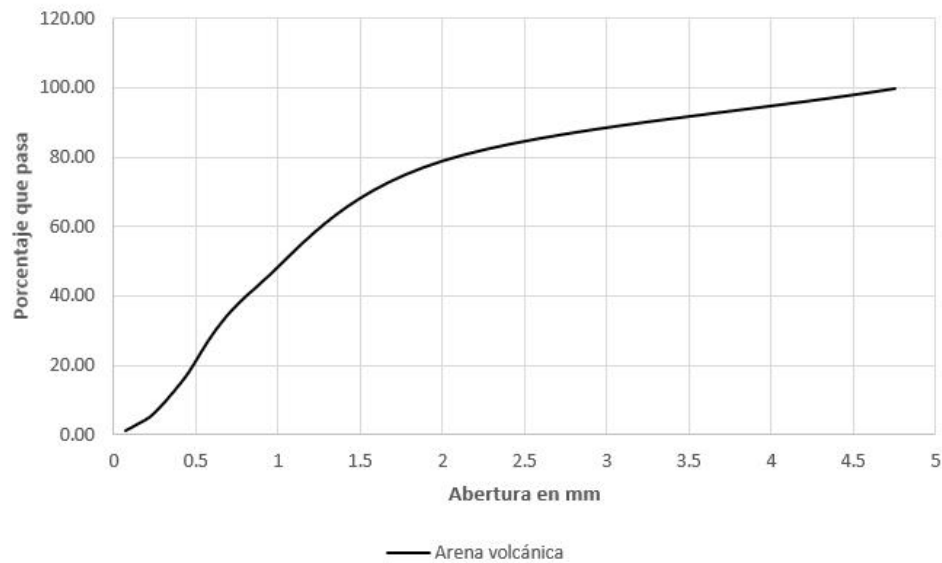


Gráfico 3. Granulometría de la arena volcánica

Granulometría agregado grueso

Se muestran los resultados de las granulometrías para el material hecho a partir de PET y el agregado grueso natural.

GRANULOMETRÍAS AGREGADOS GRUESOS

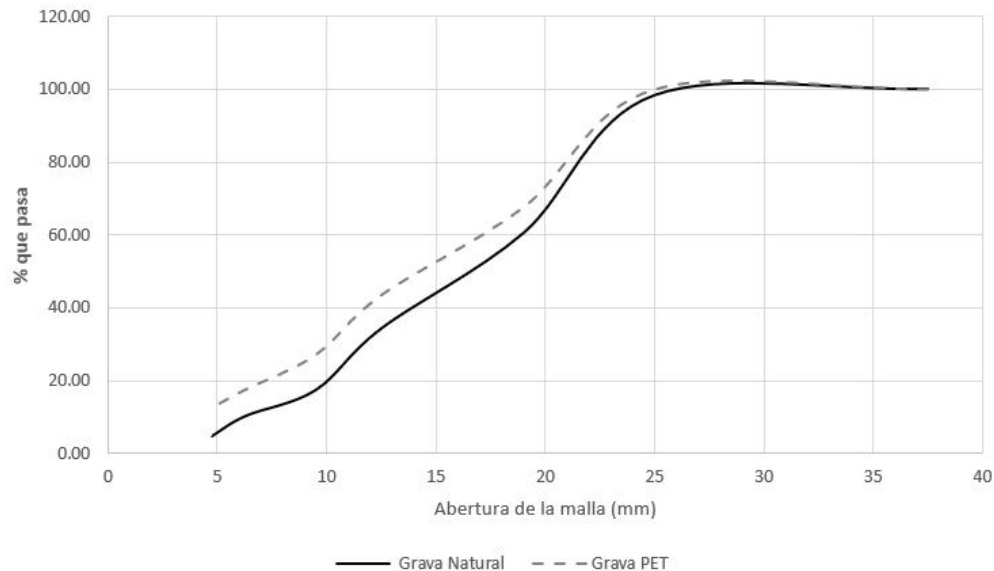


Gráfico 4. Granulometrías en agregados gruesos

Partículas lajeadas y alargadas

Los valores que se muestran en la tabla 33 corresponden a la prueba de partículas lajeadas y alargadas, mismas que fueron sometidas a los requisitos de calidad del material pétreo de

granulometría densa establecidos en la (N-CMT-4-04, 2008), misma que indica que el valor máximo en porcentaje debe ser el 40%.

Tabla 33. Resultados de la prueba de partículas lajeadas y alargadas

Tipo de grava	Lajeada	Alargada	Sumatoria	Criterio
Triturada	18.30%	19.90%	38.20%	Cumple
PET	12.45%	16.45%	28.90%	Cumple

4.7 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Integración de la muestra

Al realizar la integración de la muestra con los valores obtenidos a partir de la granulometría de nuestro agregado pétreo grueso y fino. No cumplía con los límites indicados en la (N-CMT-4-04, 2008), como se muestra en el gráfico 5. A pesar de que se realizaron varias propuestas de porcentajes para el agregado fino con el agregado grueso. Observando que los valores fuera de rango se encuentran en las mallas con aberturas menores y mayores.

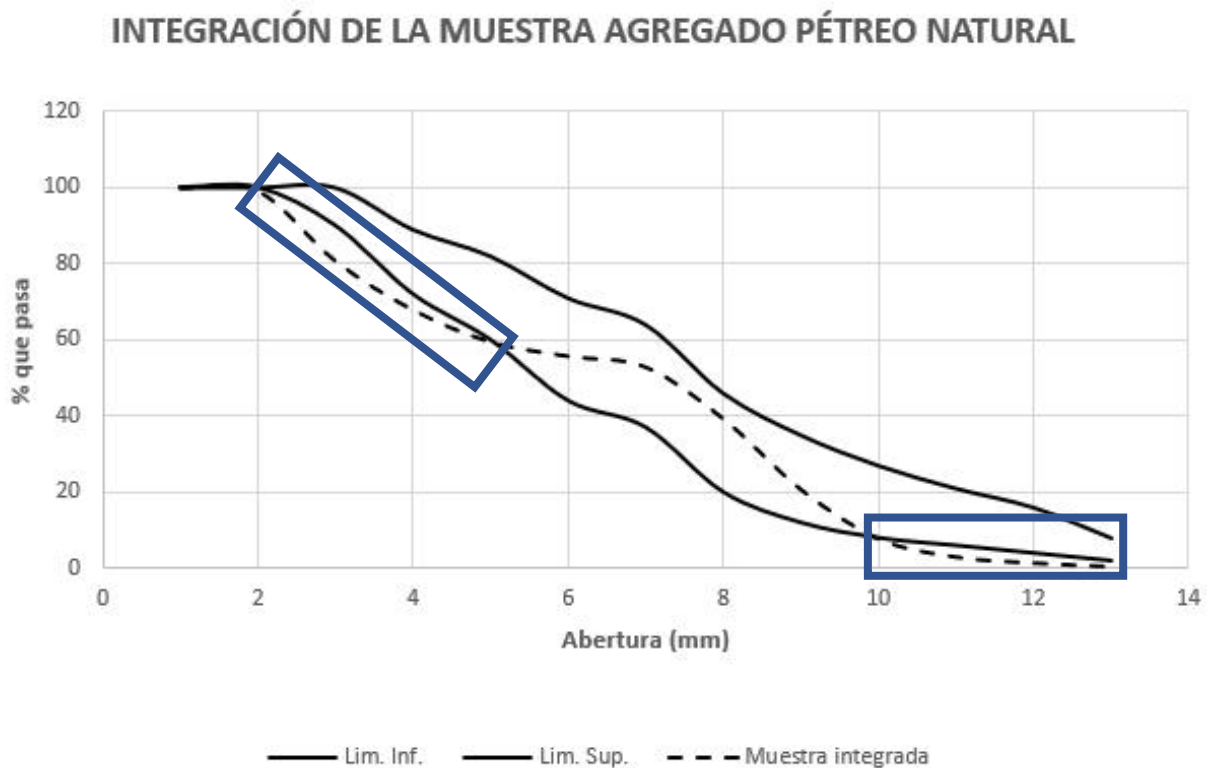


Gráfico 5. Integración de la muestra para el agregado pétreo

Por ello, se propone trabajar con el método de selección de agregados pétreos por mallas con la finalidad de ajustarnos a los límites establecidos, obteniendo de esta manera el gráfico 6 que ya se integra dentro de los límites con valores del 45% de agregado grueso natural y 55% de agregado fino natural.

INTEGRACIÓN DE LA MUESTRA AGREGADO PÉTREO NATURAL

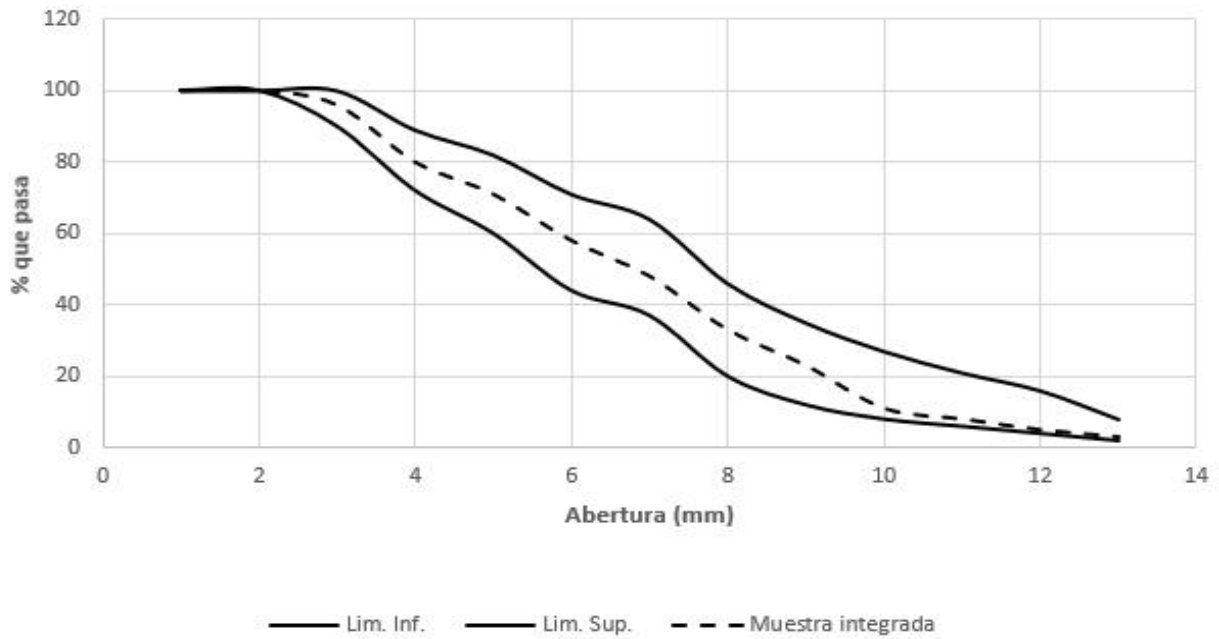


Gráfico 6. Integración de la muestra del agregado pétreo natural correcta

Se determina esta integración como la correspondiente a la mezcla control de nuestra experimentación, misma que servirá como punto de comparación con aquellas mezclas que tendrán la sustitución del agregado hecho a partir de PET.

En el gráfico 7 se muestran la integración de las muestras para los 3 porcentajes de sustitución del agregado pétreo natural por agregado de PET en volumen.

INTEGRACIÓN DE LA MUESTRA AGREGADOS DE PET

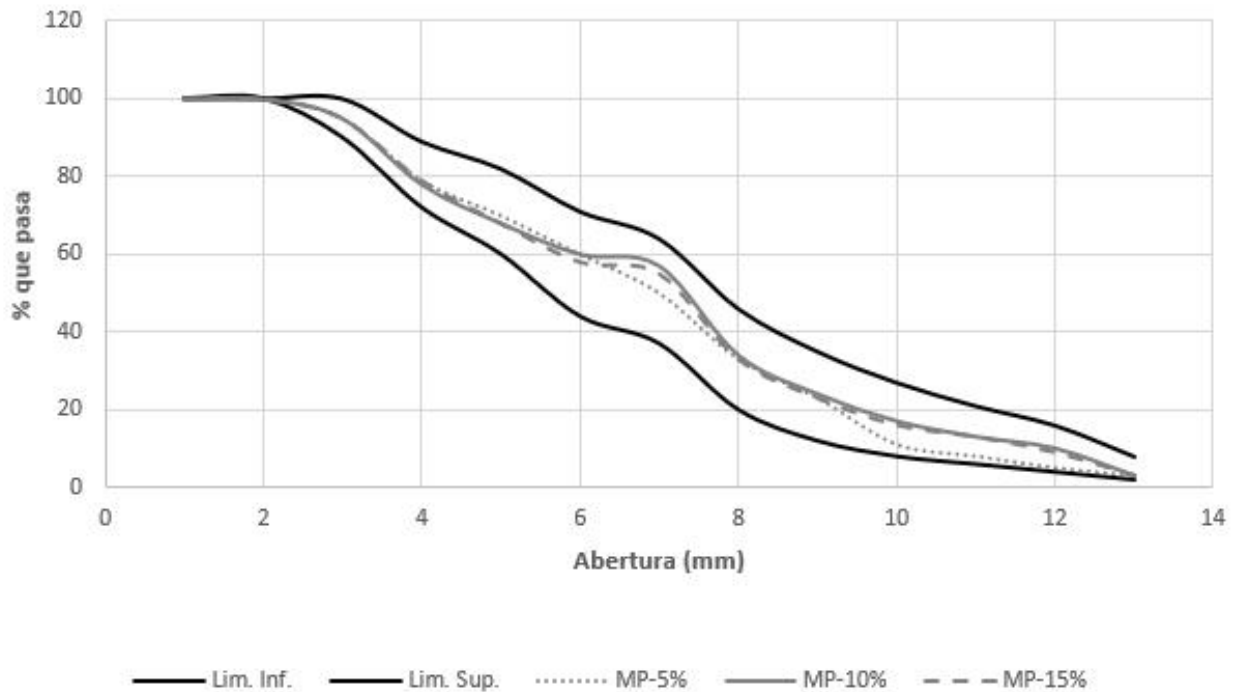


Gráfico 7. Integración de la muestra para las mezclas con agregado de PET

Obteniendo de esta manera la integración de la muestra para todas nuestras mezclas, realizando la sustitución correspondiente como se muestra en la tabla.

Tabla 34. Resumen de proporción de los agregados para diferentes mezclas

Mezcla	Agregado grueso	Agregado fino	Agregado de PET
MC-0%	45%	55%	0%
MP-5%	40%	55%	5%
MP-10%	35%	55%	10%
MP-15%	30%	55%	15%

Tabla 35 . Cantidades de los agregados para la integración de la muestra de todas las mezclas

Mezcla	Agregado grueso (kg)	Agregado fino (kg)	Agregado de PET (kg)
MC-0%	7.94	9.70	0
MP-5%	7.53	9.70	0.40
MP-10%	7.12	9.70	0.81
MP-15%	6.72	9.70	1.21

Contenido mínimo de asfalto

Se realiza con la ecuación 7, teniendo en consideración un material clasificado como *rocas trituradas de alta absorción*.

Ecuación 7. Contenido mínimo de asfalto

$$A = 0.02(67) + 0.045(30.25) + (2.75 * 0.35)$$

Tabla 36. Resultado del contenido mínimo de asfalto

Contenido mínimo de asfalto	3.664
-----------------------------	-------

Elaboración de los especímenes Marshall

Todas las mezclas para la elaboración de los especímenes Marshall se realizaron con los agregados específicos para cada malla en su total. Y la cantidad de asfalto según el porcentaje con el que se trabaja (en gr).

- MC-0% (mezcla control)



Ilustración 50. Agregado pétreo utilizado para la elaboración de la MC-0%

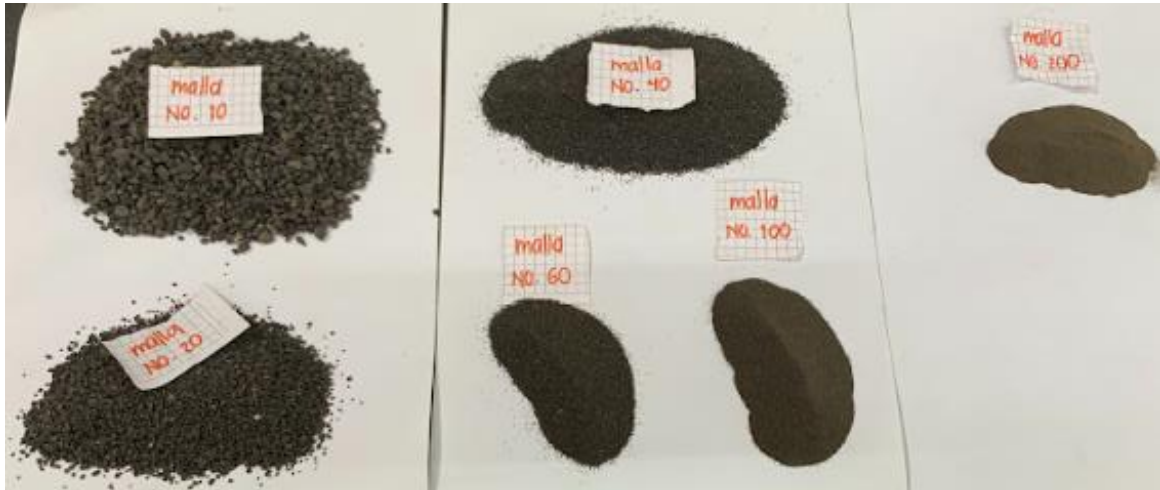


Ilustración 51. Agregado fino para la elaboración de la MC-0%

Al solo realizarse la sustitución del agregado pétreo grueso, la cantidad de agregado fino será la misma para todas las mezclas.

- **MP-5% (mezcla 5% de sustitución de PET)**



Ilustración 52. Material pétreo grueso con la sustitución del 5% de PET

- **MP-10% (mezcla 10% de sustitución de PET)**



Ilustración 53. Material pétreo grueso con la sustitución del 10% de PET

- **MP-15% (mezcla 15% de sustitución de PET)**



Ilustración 54. Material pétreo grueso con la sustitución del 15% de PET

Una vez clasificados los agregados para realizar las mezclas asfálticas se procedió a realizar el proceso de fabricación de los especímenes, siendo este proceso el mismo para todas las mezclas y especímenes como se establece en el apartado de “Elaboración de los especímenes Marshall (pastillas)”.

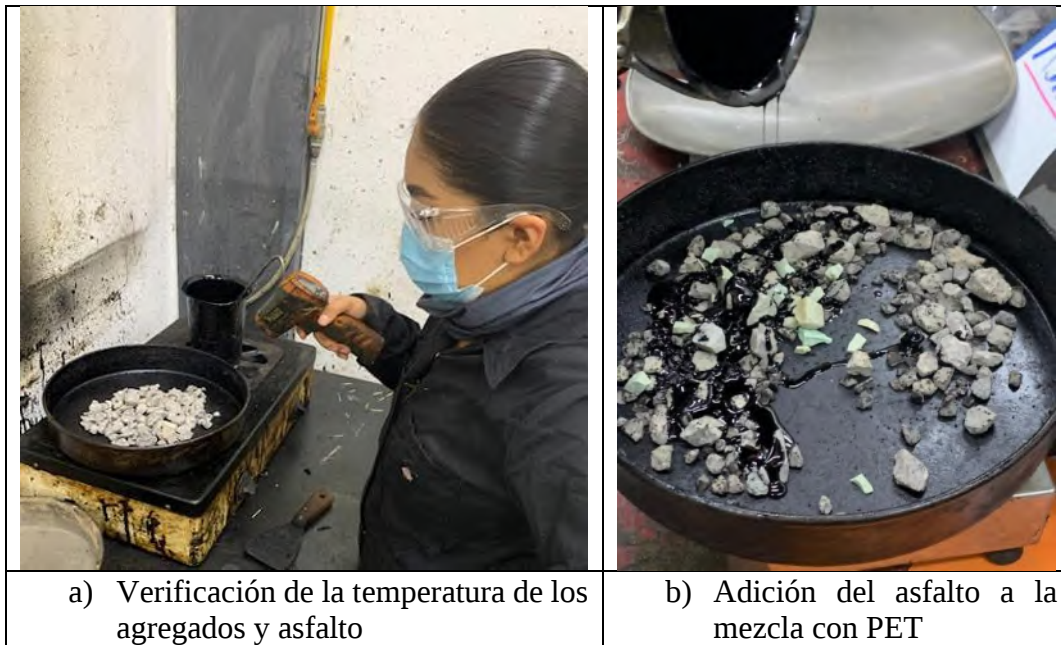


Ilustración 55. Proceso inicial de la realización de especímenes Marshall

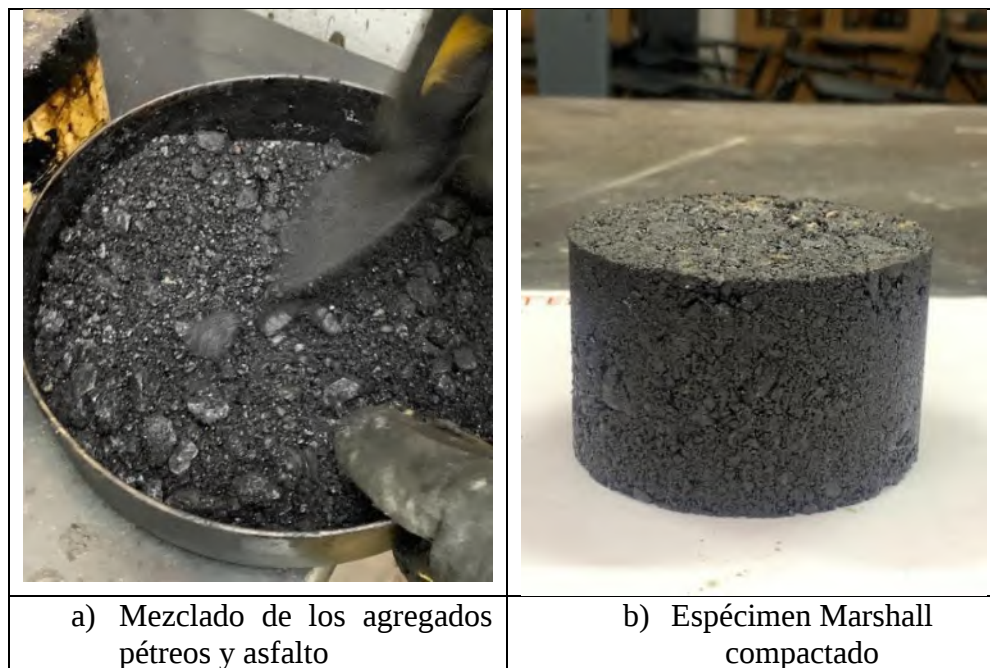


Ilustración 56. Mezclado final para la elaboración del espécimen Marshall.

Determinación de las propiedades volumétricas de los especímenes Marshall

- MC-0% (mezcla control)

Se presentan a continuación los resultados de las propiedades volumétricas de la mezcla control.

Porcentajes de vacíos

En el gráfico 8 se muestran los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos en la MC-0%, para los porcentajes de asfalto analizados y los límites establecidos.

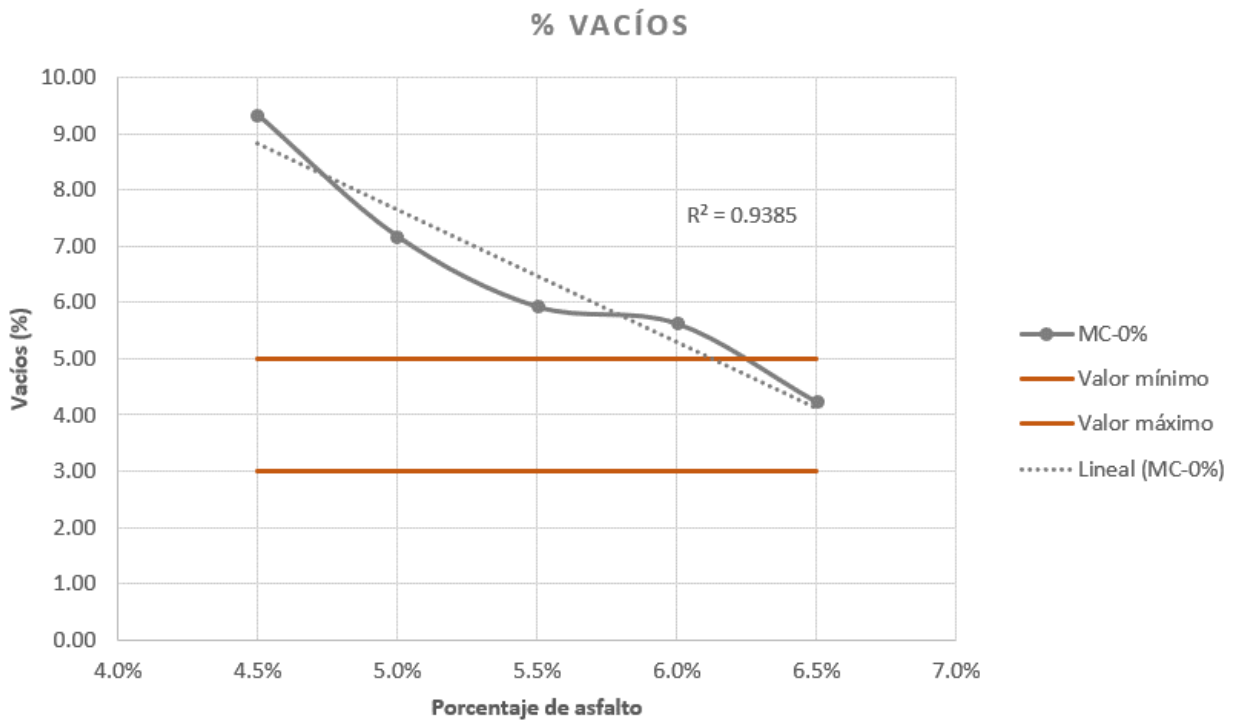


Gráfico 8. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MC-0%

Porcentajes de vacíos del agregado mineral

En el gráfico 9 se muestran los valores de los vacíos en el agregado (aire) más el espacio ocupado por asfalto. Para la MC-0%

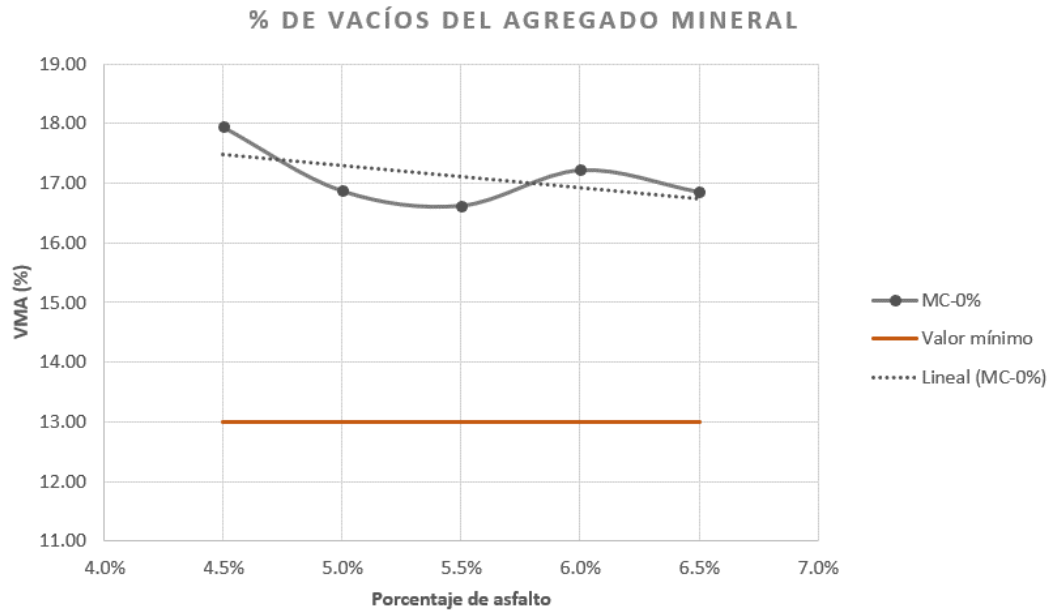


Gráfico 9. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MC-0%

Porcentajes de vacíos rellenos de asfalto

En el gráfico 10 se muestra la cantidad de asfalto que llena los espacios vacíos entre los agregados. Para la MC-0%

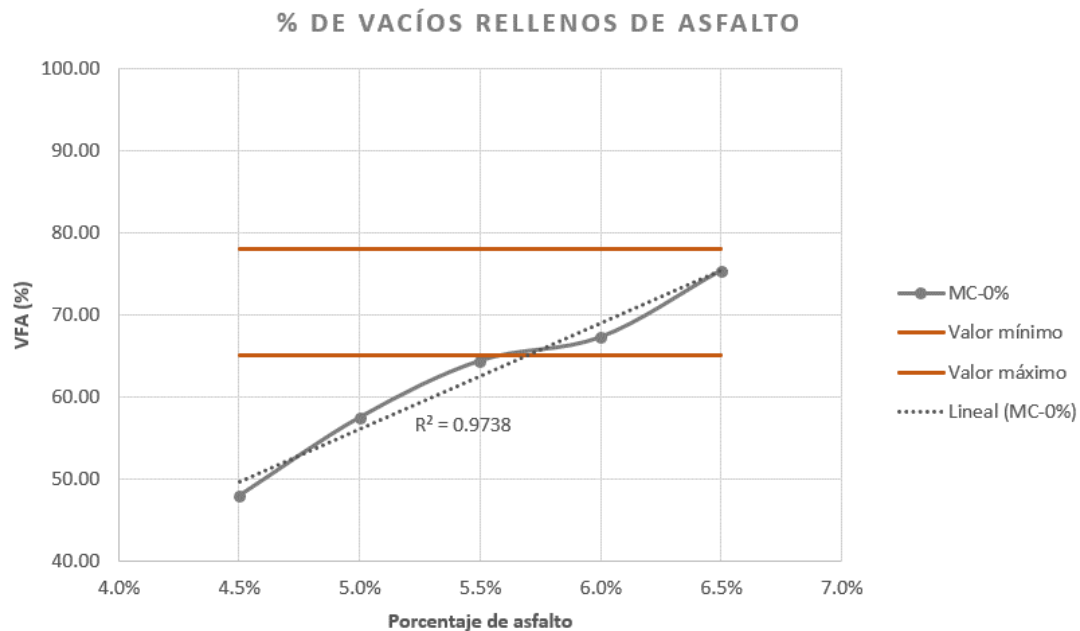


Gráfico 10. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MC-0%

- MP-5% (mezcla con 5% de PET)

Porcentajes de vacíos

En el gráfico 11 se muestran los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos en la MP-5%, para los porcentajes de asfalto analizados y los límites establecidos.

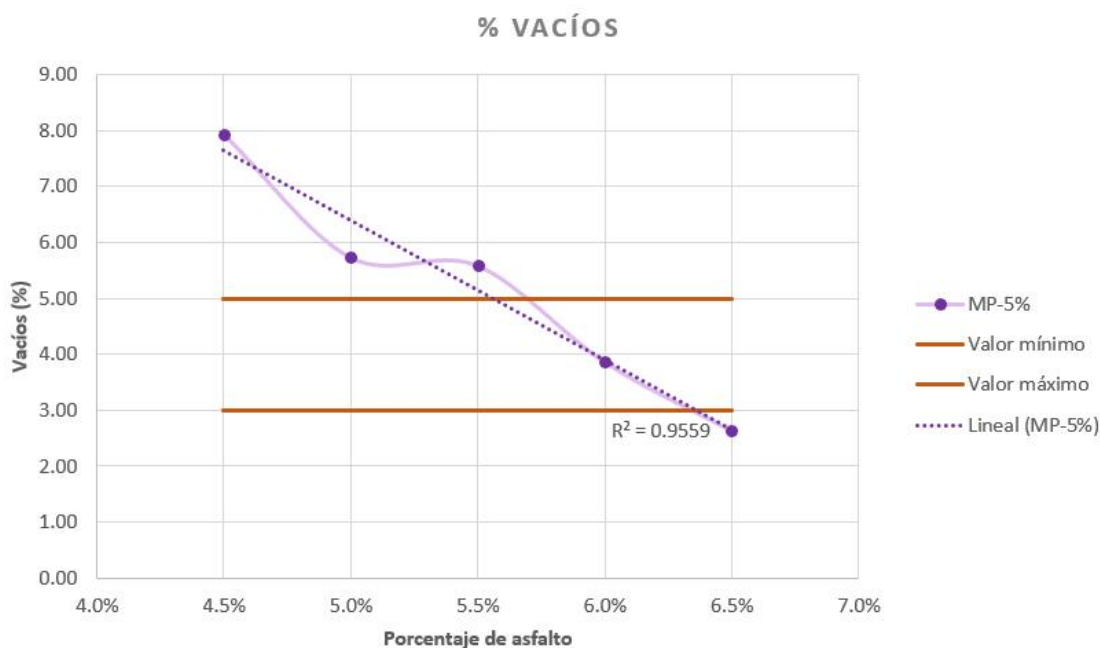


Gráfico 11. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-5%

Porcentajes de vacíos del agregado mineral

En el gráfico 12 se muestran los valores de los vacíos en el agregado (aire) más el espacio ocupado por asfalto. Para la MP-5%

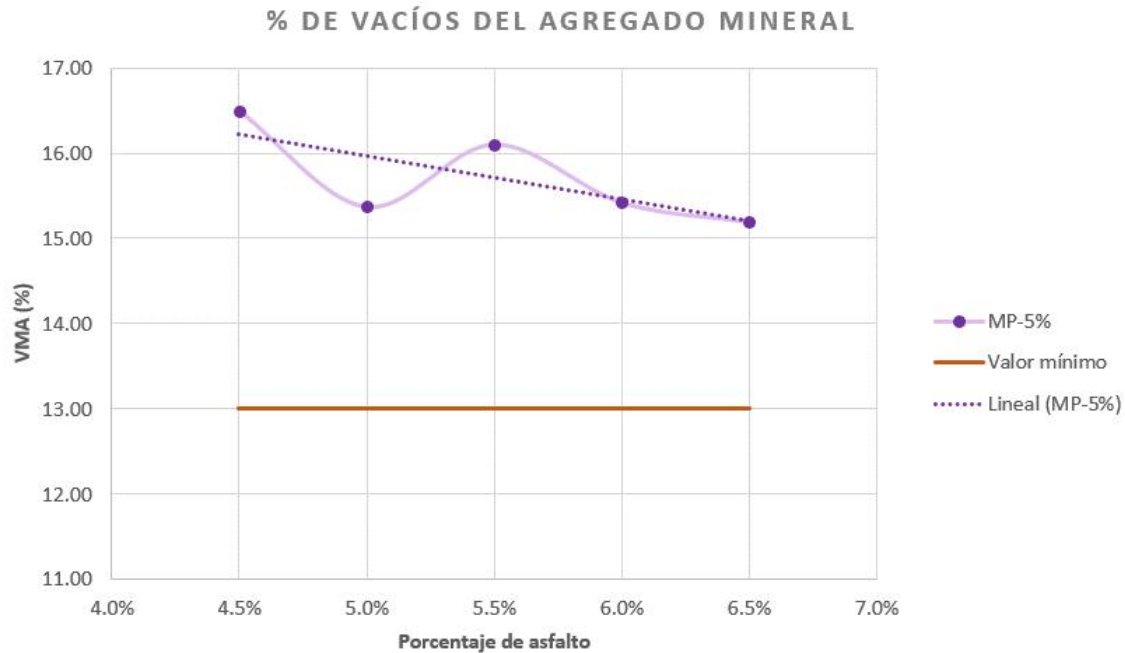


Gráfico 12. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-5%

Porcentajes de vacíos rellenos de asfalto

En el gráfico 13 se muestra la cantidad de asfalto que llena los espacios vacíos entre los agregados. Para la MP-5%

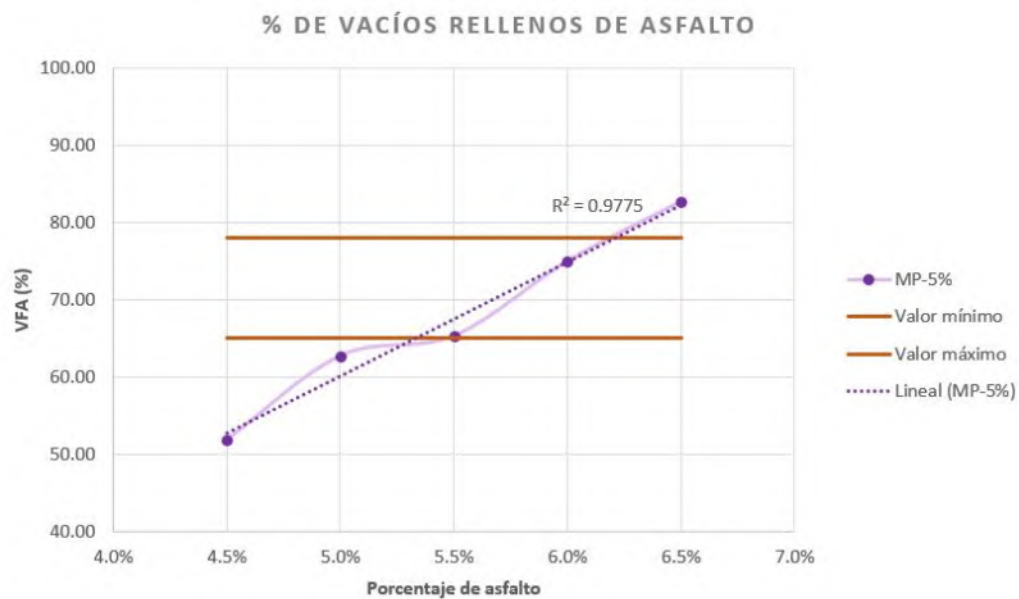


Gráfico 13. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-5%

- **MP-10% (mezcla con 10% de PET)**

Porcentajes de vacíos

En el gráfico 14 se muestran los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos en la MP-10%, para los porcentajes de asfalto analizados y los límites establecidos.

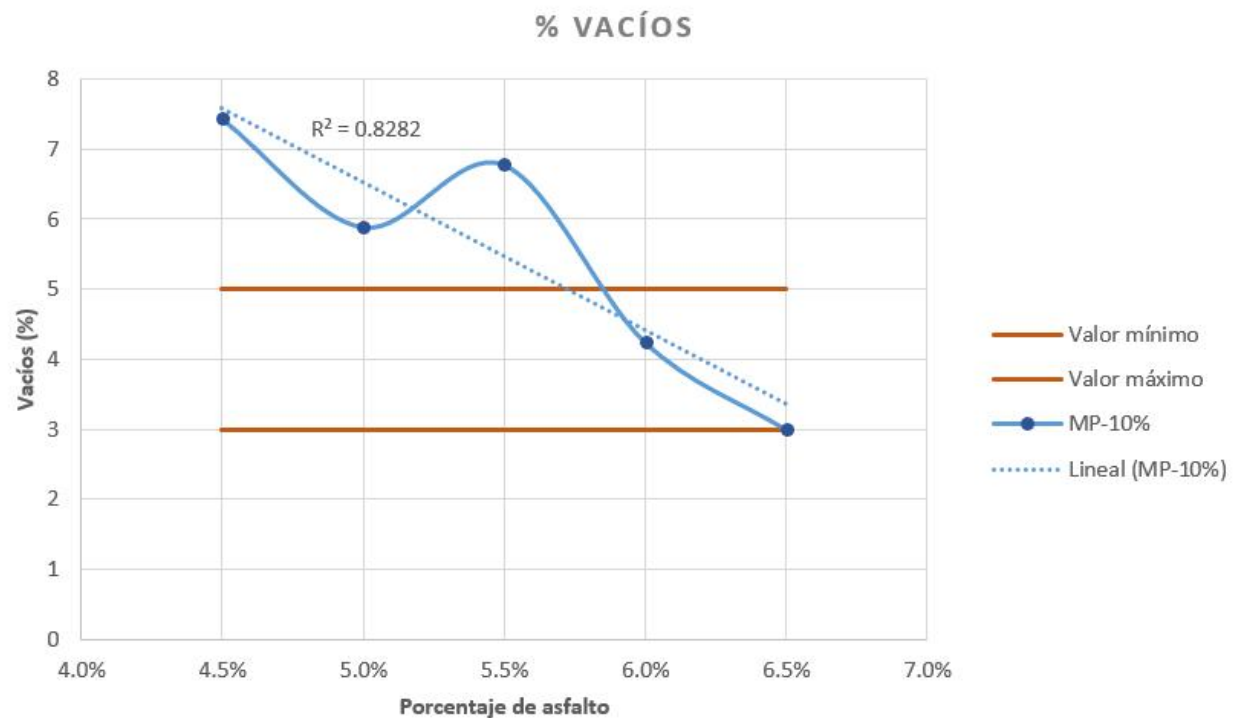


Gráfico 14. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-10%

Porcentajes de vacíos del agregado mineral

En el gráfico 15 se muestran los valores de los vacíos en el agregado (aire) más el espacio ocupado por asfalto. Para la MP-10%

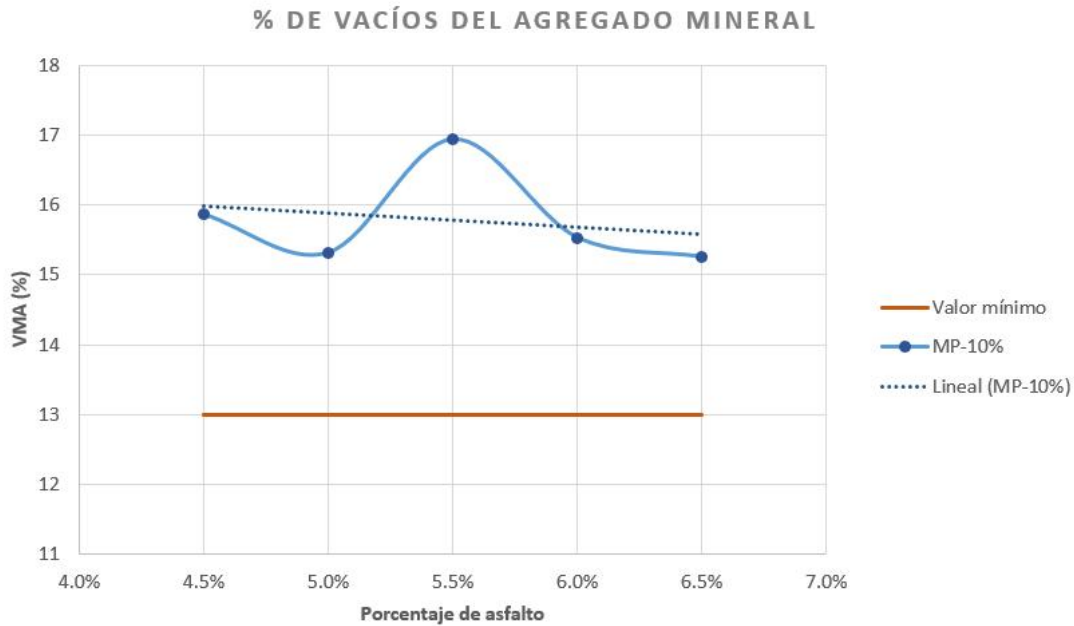


Gráfico 15. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-10%

Porcentajes de vacíos rellenos de asfalto

En el gráfico 16 se muestra la cantidad de asfalto que llena los espacios vacíos entre los agregados. Para la MP-10%

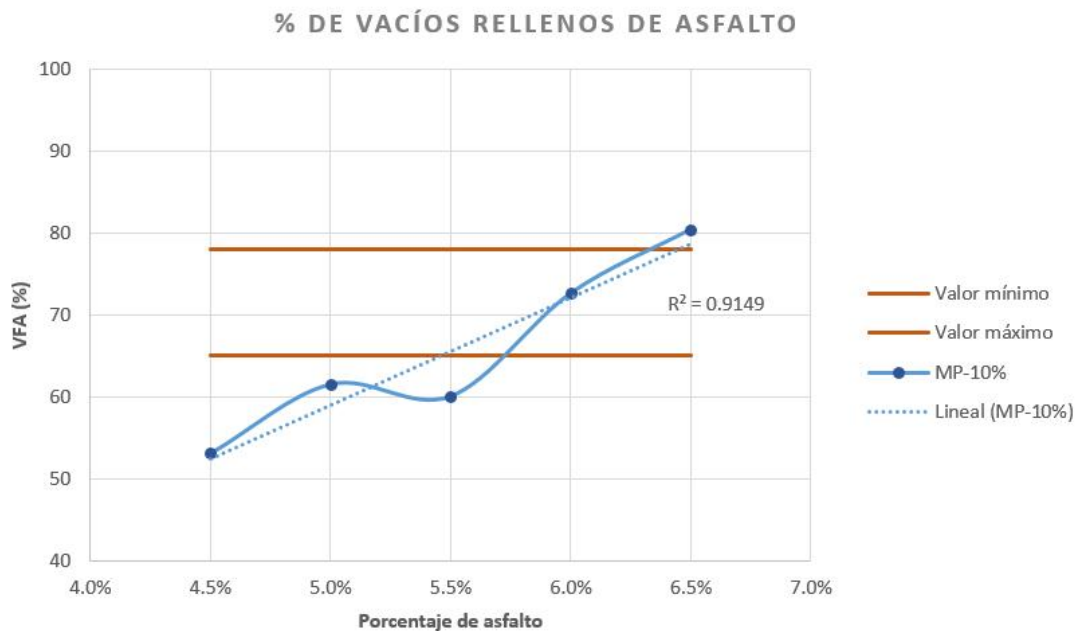


Gráfico 16. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-10%

- **MP-15% (mezcla con 15% de PET)**

Porcentajes de vacíos

En el gráfico 17 se muestran los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos en la MP-15%, para los porcentajes de asfalto analizados y los límites establecidos.

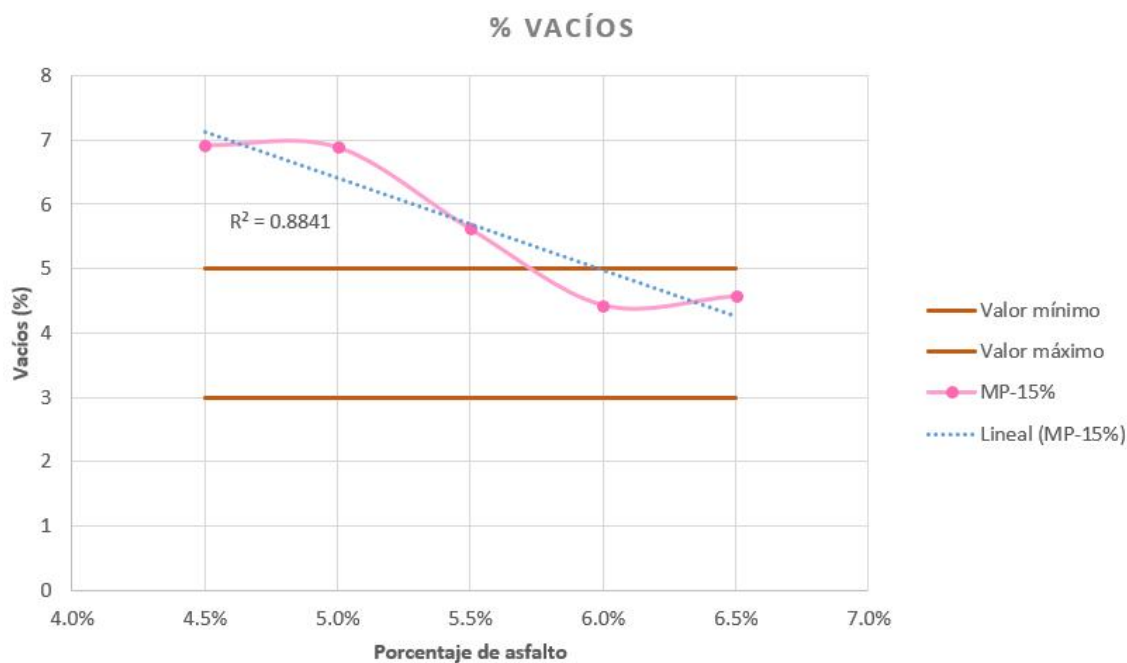


Gráfico 17. Porcentajes de vacíos en los especímenes en la mezcla MP-15%

Porcentajes de vacíos del agregado mineral

En el gráfico 18 se muestran los valores de los vacíos en el agregado (aire) más el espacio ocupado por asfalto. Para la MP-15%.

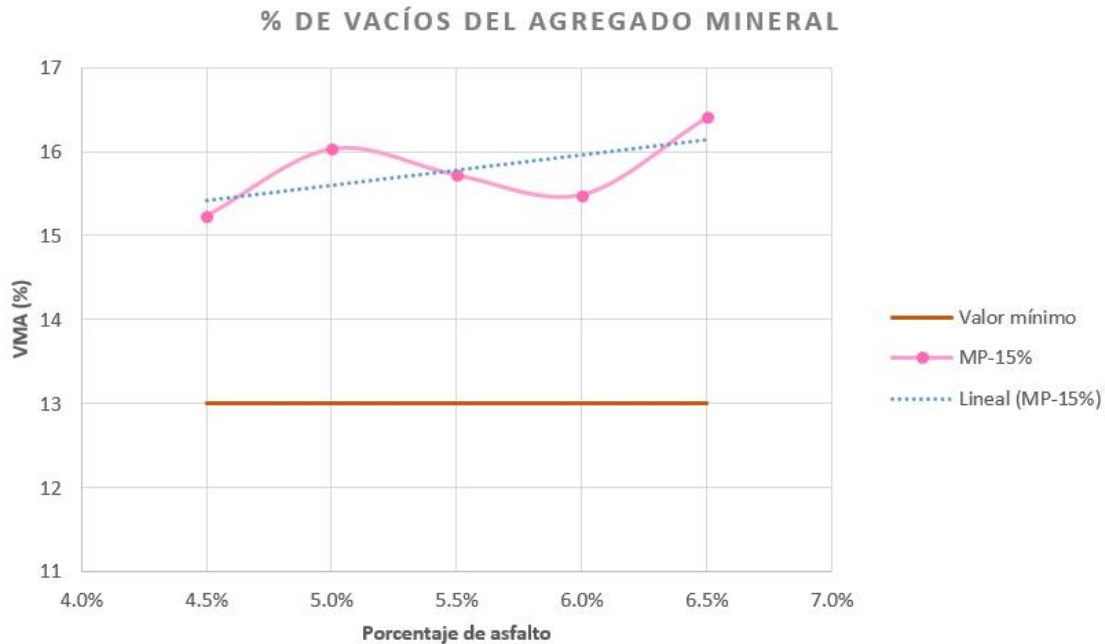


Gráfico 18. Porcentajes de VMA en los especímenes de la mezcla MP-15%

Porcentajes de vacíos rellenos de asfalto

En el gráfico 19 se muestra la cantidad de asfalto que llena los espacios vacíos entre los agregados. Para la MP-15%

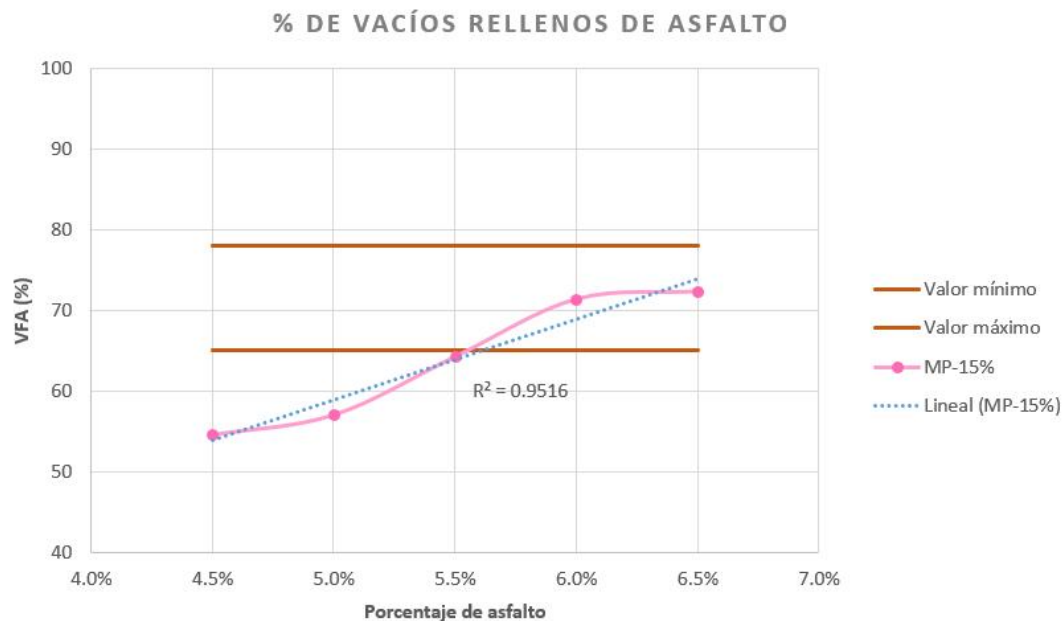


Gráfico 19. Porcentajes de VFA en los especímenes de la mezcla MP-15%

Densidades específicas de las mezclas

En el gráfico 20 podemos observar los valores la relación entre la masa de las mezclas compactadas y el volumen total, incluyendo los vacíos de aire.

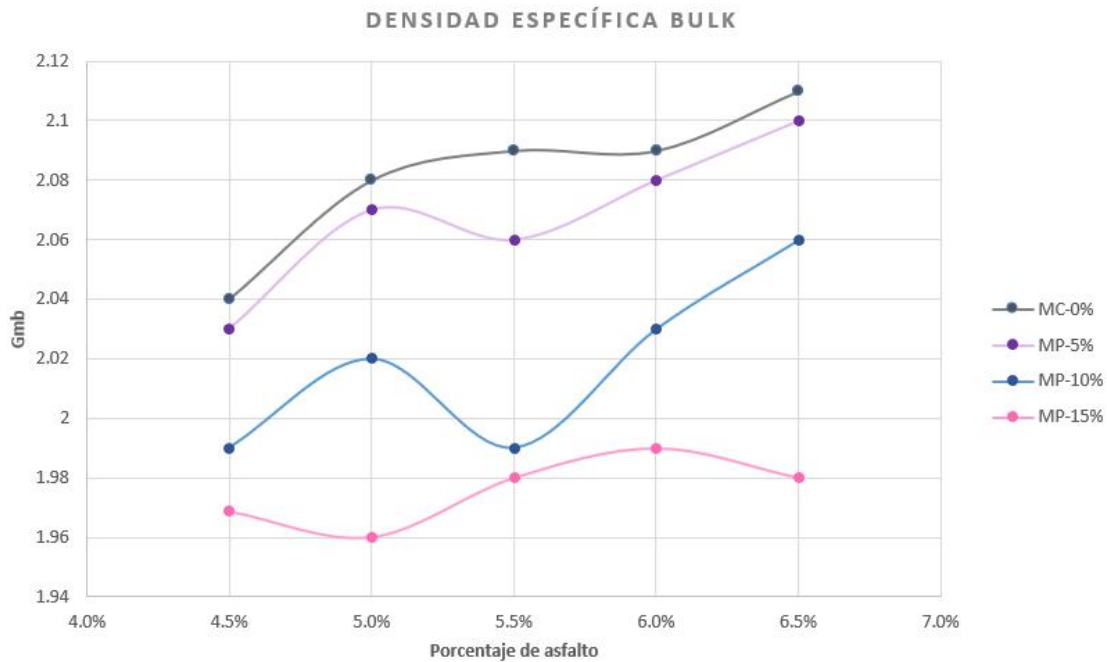


Gráfico 20. Resumen de valores de Gmb para todas las mezclas asfálticas

Estabilidad y flujo Marshall

- MC-0% (mezcla control)

En el gráfico 21 se observan los valores de la prueba de estabilidad Marshall para los porcentajes evaluados. Y el flujo Marshall en el gráfico 22, ambos para la mezcla control (MC-0%).

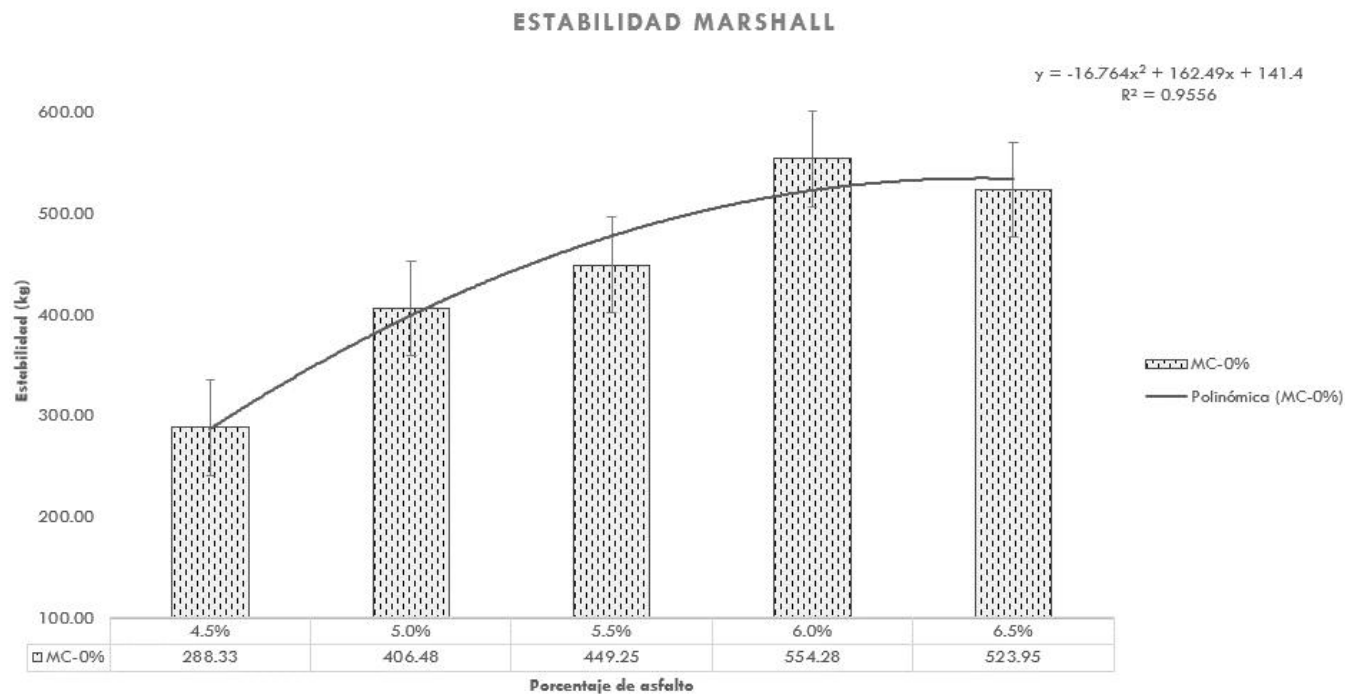


Gráfico 21. Estabilidad Marshall para la mezcla control (MC-0%)

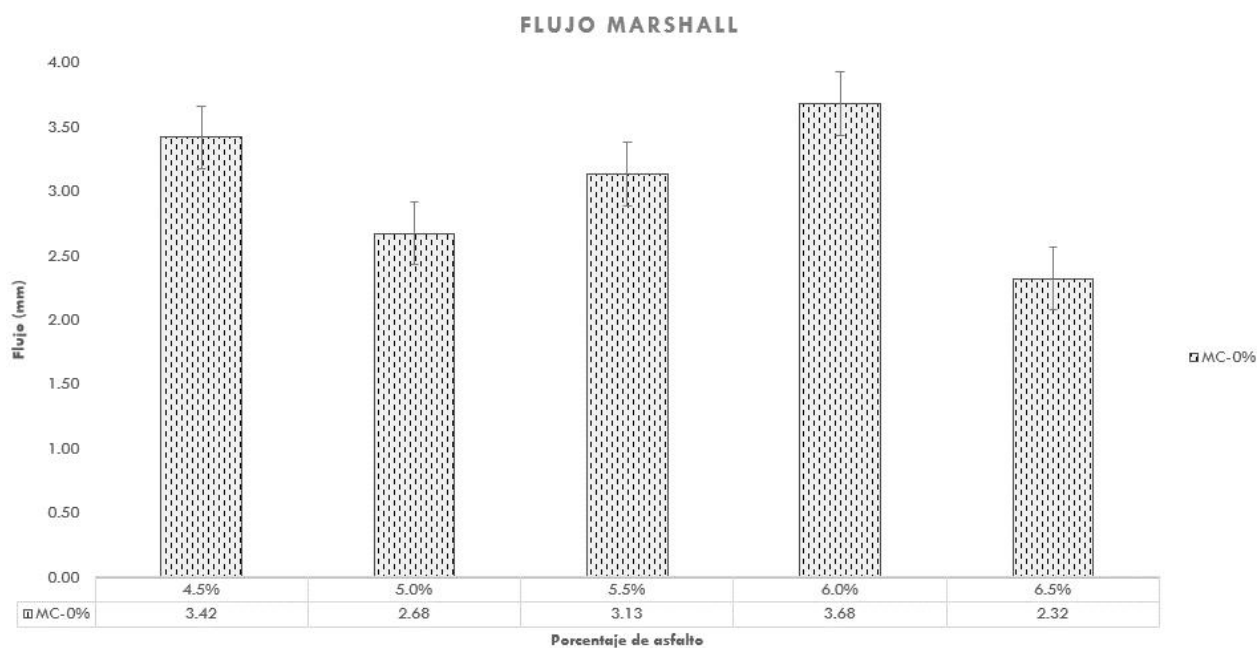


Gráfico 22. Flujo Marshall de los especímenes de la MC-0%

- MP-5% (mezcla con 5% de PET)

En el gráfico 23 se observan los valores de la prueba de estabilidad Marshall para los porcentajes evaluados. Y el flujo Marshall en el gráfico 24, ambos para la mezcla (MP-5%).

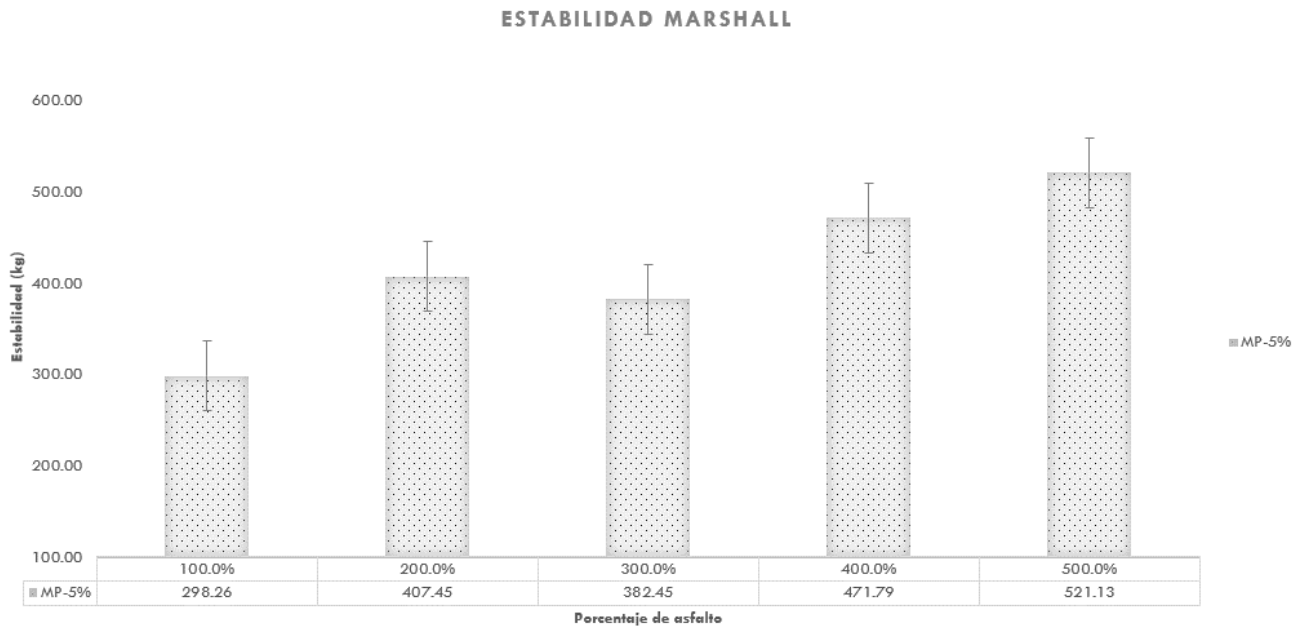


Gráfico 23. Estabilidades para la mezcla con PET al 5% (MP-5%)

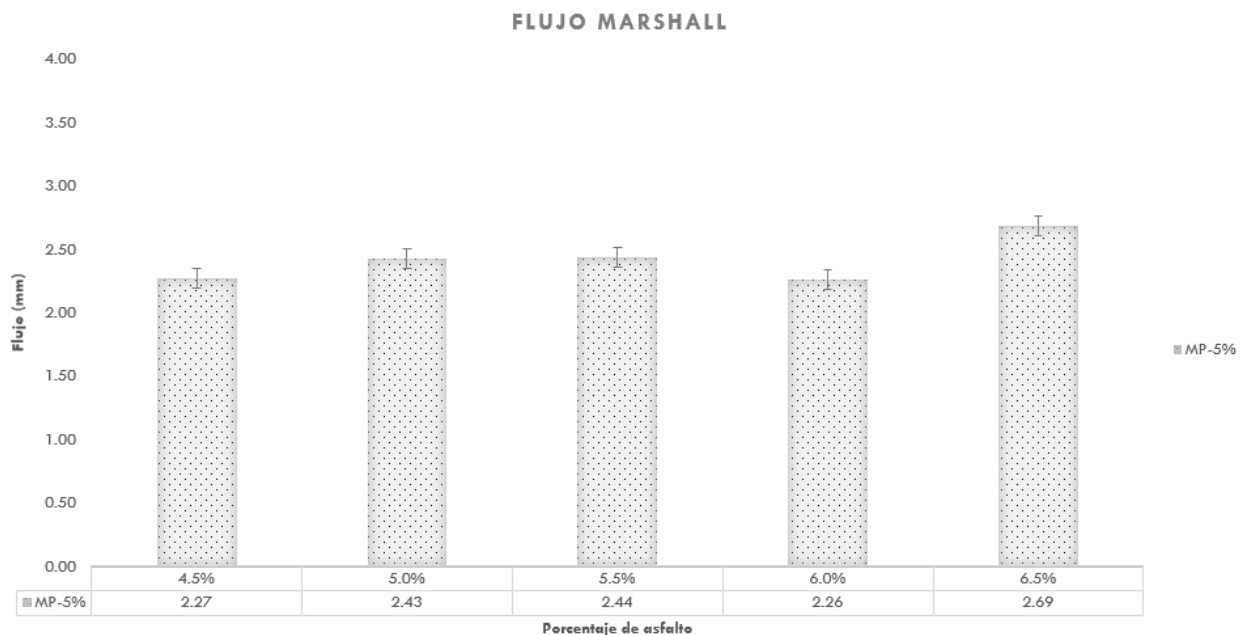


Gráfico 24. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 5% (MP-5%)

- **MP-10% (mezcla con 10% de PET)**

En el gráfico 25 se observan los valores de la prueba de estabilidad Marshall para los porcentajes evaluados. Y el flujo Marshall en el gráfico 26, ambos para la mezcla (MP-10%).

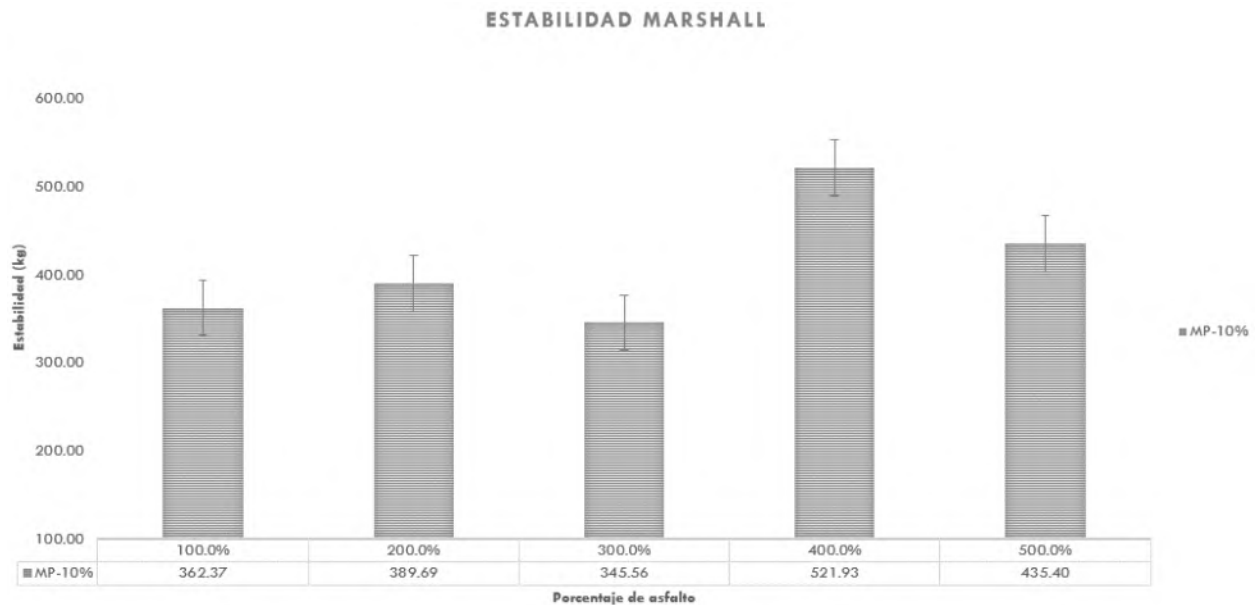


Gráfico 25. Estabilidades para la mezcla con PET al 10% (MP-10%)

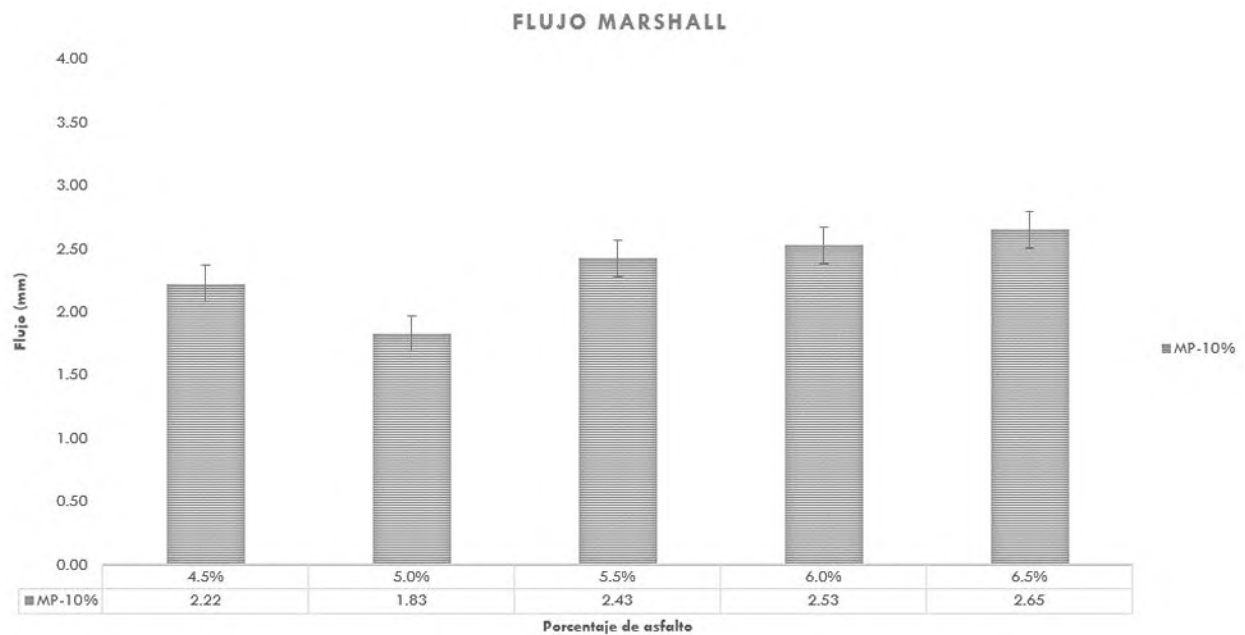


Gráfico 26. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 10% (MP-10%)

- MP-15% (mezcla con 15% de PET)

En el gráfico 27 se observan los valores de la prueba de estabilidad Marshall para los porcentajes evaluados. Y el flujo Marshall en el gráfico 28, ambos para la mezcla (MP-15%).

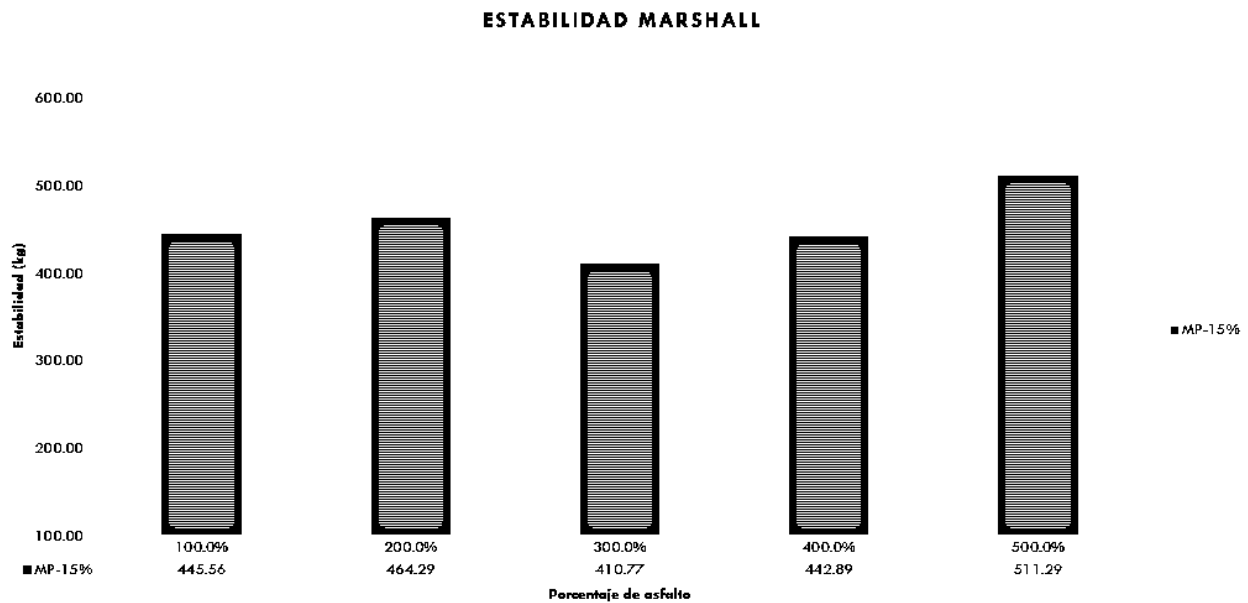


Gráfico 27. Estabilidades para la mezcla con PET al 15% (MP-15%)

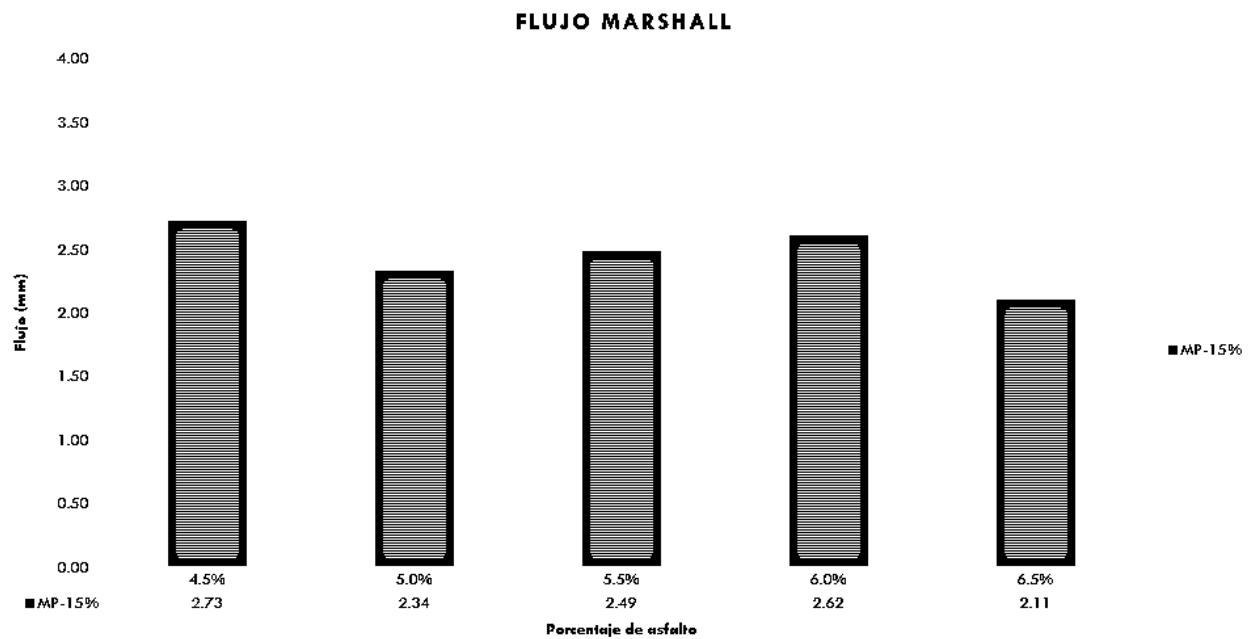


Gráfico 28. Flujo Marshall para los especímenes con PET al 15% (MP-15%)

4.8 ECONOMÍA CIRCULAR

Materias primas

Las materias primas consideradas fueron las empleadas para esta experimentación

1. Botellas de PET
2. Agregados pétreos
3. Asfalto PG 64-16

Diseño sostenible

Los diseños que se elaboraron fueron aquellos con las sustituciones del 5%, 10% y 15%, teniendo como comparativa la mezcla control con 0% de sustitución.

A partir de los diseños de nuestras mezclas asfálticas, se muestra en la tabla 37 las cantidades de agregados que se necesitan para la fabricación de 1 km de vía, teniendo en cuenta las siguientes características de esta vía:

- a) Longitud: 1000 m
- b) Ancho: 3.5 m
- c) Espesor: 0.05 m

Mencionado que el porcentaje de asfalto óptimo que se obtiene no afecta a estas cantidades.

Tabla 37. Cantidades de agregados para 1km de vía para todas las mezclas asfálticas

MEZCLA	Agregado grueso natural (ton)	Agregado fino natural (ton)	Agregado de PET (ton)
MC-0%	174.6	213.4	0
MP-5%	165.7	213.4	4.07
MP-10%	156.7	213.4	8.14
MP-15%	147.8	213.4	12.20

Finalmente se tienen cantidades de PET de 4 a 12 toneladas según los porcentajes de sustitución, misma cantidad de botellas de PET que se retirarían del ambiente. En virtud de que para la producción del agregado de PET no se tiene un desperdicio significativo (menos del 5%).

Producción

La elaboración de las mezclas asfálticas en caliente se realiza considerando las siguientes temperaturas:

- a) Asfalto: 130°C – 160°C
- b) Agregados pétreos: 140°C – 155°C (Agregado grueso natural triturado, agregado de PET, agregado fino)
- c) Mezcla asfáltica: 130°C $\pm$ 5°C

Temperaturas que son amigables con el agregado hecho de PET, dado que las temperaturas de fundición del PET son de 260°C. La producción de mezclas asfálticas generalmente es en planta. En este caso con la finalidad de evaluar su desempeño se elaboraron especímenes Marshall, mismos que son sometidos a pruebas destructivas y no destructivas para conocer su resistencia a la carga y deformación. Resultados que son mostrados en la sección 4.7 Mezclas asfálticas de este documento.

Distribución

La mezcla se almacena en silos con aislamiento térmico que mantienen la temperatura adecuada en planta. Para que después de realice su distribución a obra en camiones cisterna equipados con aislamiento térmico. La coordinación logística es clave: las plantas gestionan las mejores rutas, tiempos de entrega y comunicación con obra para evitar pérdida de temperatura.

Consumo, reutilización, reparación

Durante el periodo de 2019 a 2022 según datos de la (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2023) se construyeron en México alrededor de 2526 km de caminos. Teniendo una proyección para 2023 de 1075 km y 2024 con 564 km adicionales. Lo cual nos deja con una estimación de un total de construcción con pavimento asfáltico de 2000 a 3000 km anuales. El consumo del pavimento asfáltico es constante en México y es un material que tiene en consideración su reutilización y reparación (mantenimiento) constante antes de llegar a su vida útil.

Para su reparación se realiza una evaluación o diagnóstico inicial establecido por el (Instituto Mexicano del Transporte, 2004) con el Sistema de Evaluación de Pavimentos versión 2.0. Donde se evalúa tramos de 1 km, midiendo variables como rugosidad, deflexión, fricción y tipo de deterioros para priorizar intervenciones. Posteriormente se determinará si es que se deben hacer reparaciones superficiales, estructurales o totales.

Al asfalto que es retirado y recuperado se le conoce como RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) y usualmente se utiliza en caliente o en frío. En caliente es necesario realizar una trituración y tamizado para mezclarlo con nuevo asfalto y agregados en planta. En frío se mezcla con emulsiones asfálticas y su uso es solo para bases estabilizadoras o capas intermedias.

Esto nos deja con la premisa de que el pavimento asfáltico con agregado de PET que se retirara del ambiente puede volver a implementarse ya sea en mezclas asfálticas nuevamente o como un componente de las capas de una carpeta asfáltica. Teniendo un mantenimiento convencional y no se comprometen más agregados gruesos naturales.

Recogida

Al terminar su vida útil se convierte en un residuo sólido. En México y de acuerdo con lo establecido en la (LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS, 2003), se clasifican en 3 grupos; Residuos Sólidos Urbanos, Residuos de Manejo Especial y Residuos Peligrosos. Siendo el correspondiente a aquellos que se generan en la industria de la construcción y demolición los clasificados como Residuos de Manejo Especial (RME). El cual que deben cumplir la norma (NOM-161-SEMARNAT, 2011) en la que se establecen los criterios para determinar cuáles RME están sujetos a un Plan de Manejo. Donde los residuos de la construcción, mantenimiento y demolición en general, que se generen en una obra en una cantidad mayor a 80 m³ están obligados a presentarlo.

Gestión de residuos-desechos residuales

Al pertenecer a la clasificación de Residuos de Manejo Especial entra también en la subclasificación de Residuos de la Construcción (RDC), donde se busca un aprovechamiento de los mismos para limitar la generación de desechos residuales, es decir, aquellos que no pueden estar incluidos dentro del ciclo de la economía circular. Toda vez que los RCD pueden ser empleados como bien se mencionó antes como RAP en mezclas asfálticas o como un sustituto parcial o total de agregados pétreos. De esta manera se consideran los residuos como insumos. Reduciendo al mínimo el uso de materias primas vírgenes. Mezclas con sustitución de PET pueden ser empleados en zonas de menor tránsito o como estabilizadores.

En Michoacán no existe legislación estatal para el manejo de los RCD, sin embargo, estados como Jalisco y EDOMEX ya han generado sus propias normas técnicas con la instalación y operación de Centros Integrales de Residuos de la Construcción y Demolición.

El congreso del estado de Jalisco decreta la “Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco” (LGIREJ) en el año 2007 con la finalidad de tener una mejor gestión de sus residuos. De igual manera en la CDMX se presenta la norma técnica estatal ambiental NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022 en el año 2022 misma que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción y demolición y su trazabilidad para el estado de México. Estos documentos poseen información muy importante para contextualizarnos de cómo se puede hacer una mejora a nivel estatal si es que existe ese compromiso. Por consiguiente, se muestra una tabla resumen de algunas secciones de estas normas y leyes estatales con la finalidad de realzar la importancia que tienen.

Tabla 38. Tabla resumen del contenido de las leyes y normas de Jalisco y el EDOMEX

Ley de Gestión Integral de los Residuos del Estado de Jalisco (LGIREJ, 2007)	
TÍTULO TERCERO CAPÍTULO V; DE LOS INSTRUMENTOS ECONÓMICOS Artículo 27	El estado y ayuntamientos en coordinación con las autoridades promueven la implementación de incentivos económicos, fiscales o financieros para aquellos que presenten un plan de manejo de tratamiento y disposición final.
TÍTULO TERCERO CAPÍTULO VIII; DE LA NORMATIVIDAD ESTATAL Artículo 32	Se genera una normatividad reglamentaria para establecer los requisitos, especificaciones, condiciones, parámetros y límites permisibles. Esto apoya a una mejora en la prevención y minimización de la generación de residuos.
TÍTULO CUARTO CAPÍTULO I; DEL INVENTARIO DE LOS RESIDUOS Y SUS FUENTES GENERADORAS Artículo 33	La Secretaría elabora un inventario para la clasificación de los residuos y sus fuentes generadoras.
NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022 (NTEA-011-SeMAGEM-RS, 2022)	
6. ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS 6.1. CRITERIOS DE CLASIFICACIÓN.	En este apartado se identifican y clasifican los residuos de la construcción o demolición de acuerdo a una categoría misma que busca

	facilitar la valorización de los residuos de una manera más sencilla.
6. ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS 6.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS. 6.2.2. Obligaciones del generador de residuos de la construcción o demolición.	En esta parte se genera la responsabilidad compartida entre los generadores y gobierno. Donde se establecen los tamaños de generadores y que requerimientos deben tener sus planes de manejo.
6. ESPECIFICACIONES Y CARACTERÍSTICAS 6.3. USO DE MATERIALES APROVECHADOS O TRATADOS EN OBRAS	Se plantea una la incorporación de productos reciclados en obra para los aprovechamientos de estos agregados, mismos que se clasifican por categorías en las que se establece sus usos, contenidos mínimos, porcentajes de uso en obra y que tipo de agregado es.

De las 32 entidades federativas que existen en México solo 2 cuentan con este tipo de documentos. Esto representa una oportunidad para Michoacán de demostrar el compromiso que se tiene con el ambiente para generar también una norma o ley estatal con respecto a esta gestión de los residuos.

La Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC) ofrece un directorio de CMIC a nivel nacional, que para el caso de Michoacán existe solo uno ubicado en la ciudad de Morelia, pero solo funciona como acopio y sin especificar si aceptan todos los RDC.

5 DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

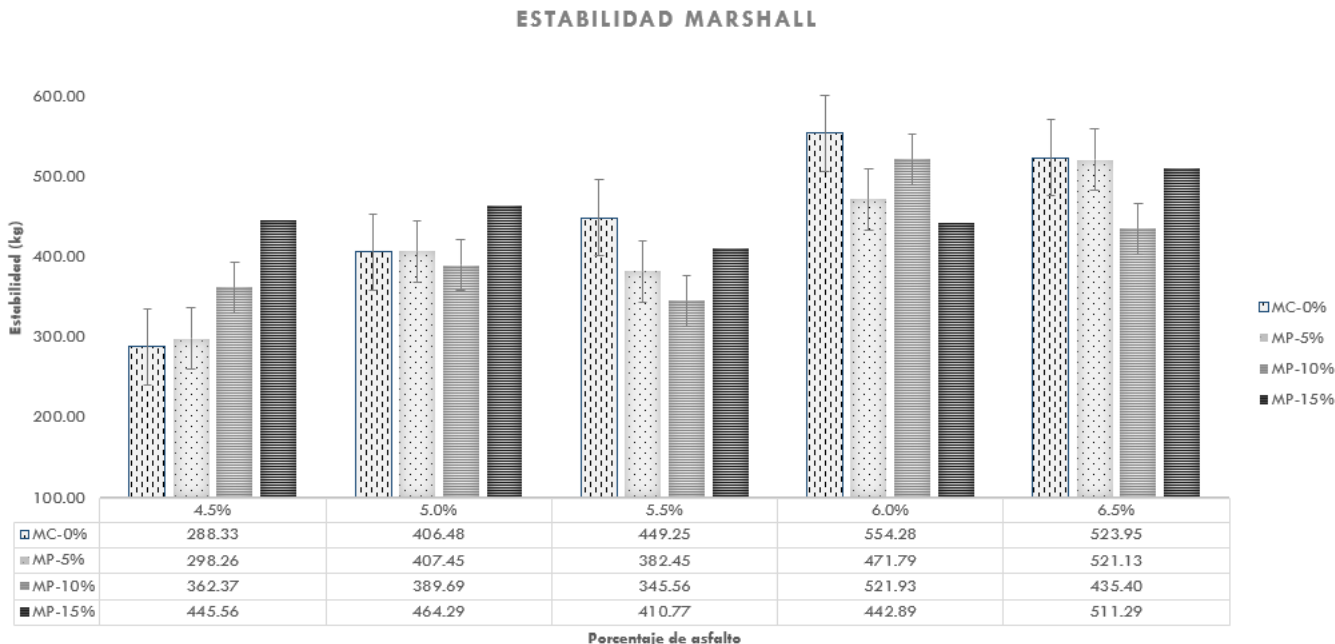


Gráfico 29. Resumen de las estabilidades para todas las mezclas

En el gráfico 29 se muestra el resumen de los valores obtenidos para todas las mezclas evaluadas. Se observa un comportamiento similar de todas las mezclas para los porcentajes de 6% y 6.5%, quienes también tienen los mejores comportamientos. Para las mezclas con 4.5% de asfalto, el mejor comportamiento fue de la mezcla MP-15% que tiene el mayor porcentaje de sustitución, superando el valor de estabilidad en un 55% con respecto a la MC-0%. La mezcla MP-5% obtuvo su mejor comportamiento en el porcentaje de asfalto del 6.5%, la mezcla MP-10% lo obtuvo con el 6% de asfalto al igual que la MC-0%. Para el 4.5% y 5% de asfalto el mejor comportamiento lo obtuvo la MP-15%. Para las mezclas con 5.5%, 6% y 6.5% de asfalto el mejor comportamiento lo obtuvo la MC-0%.

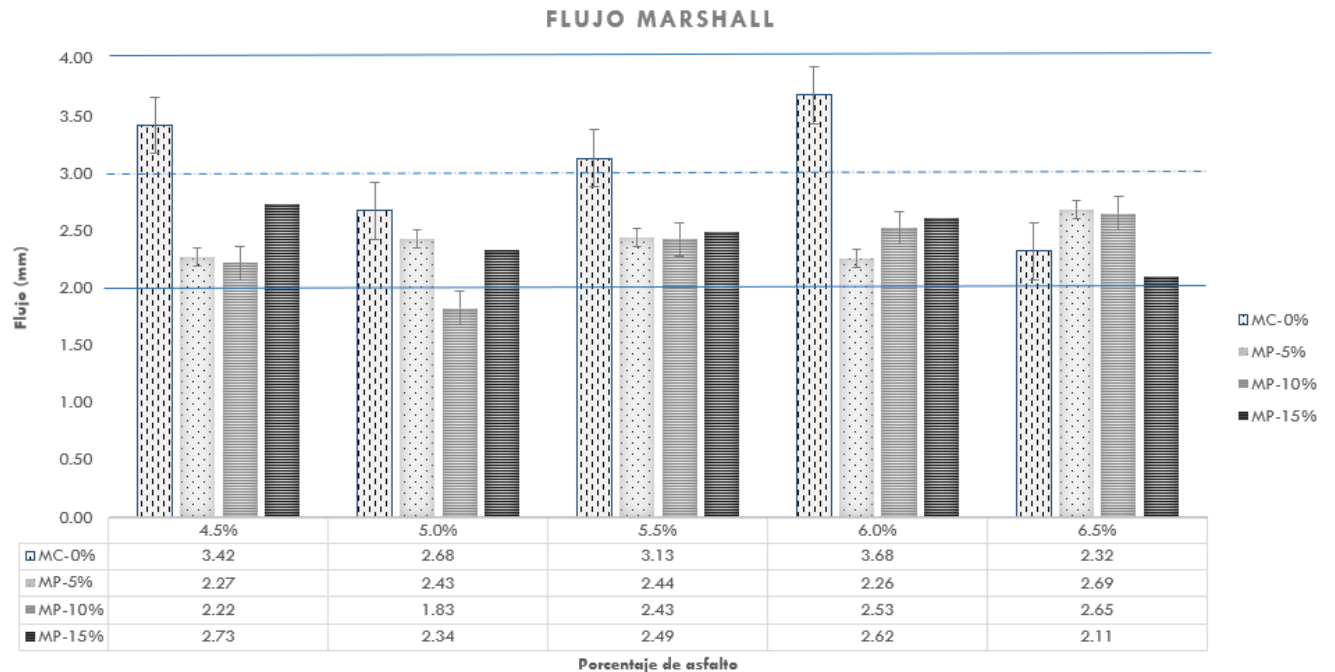


Gráfico 30. Resumen de los valores de flujo para todas las mezclas

Lo mostrado en el gráfico 30 corresponde a los valores de flujo de todas las mezclas asfálticas realizadas. Donde solamente el valor correspondiente a la MP-10% con 5% de asfalto no entra en el rango aceptable de 2-4 mm. Teniendo un comportamiento atípico comparado a las demás mezclas. Las mezclas que presentan los valores de flujo más altos son las correspondientes a la MC-0%, al menos en los primeros 4 porcentajes de asfalto evaluados, mientras que los que tienen un comportamiento más cercano al límite inferior son aquellos con las mezclas con sustitución de PET.

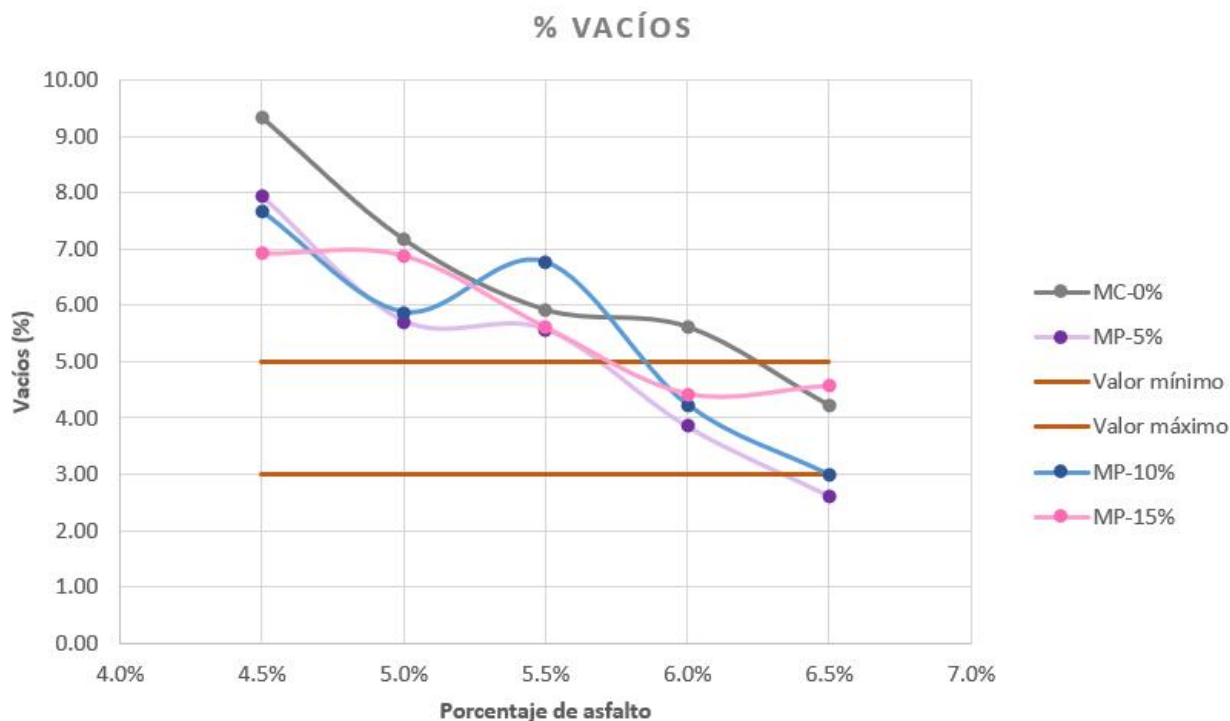


Gráfico 31. Resumen de los porcentajes de vacíos de las mezclas

Es posible ver en el gráfico 31 que las mezclas con menor porcentaje de asfalto tienen mayor cantidad de vacíos, esto debido a la falta de ligante para los agregados pétreos. Ya que se muestra una tendencia en la que a partir del 6% de asfalto estos vacíos reducen considerablemente y se mantienen dentro de los límites para todas las mezclas. Excepto por la MC-0% para el 6% de asfalto que excede el valor máximo y la mezcla MP-5% con 6.5% de asfalto que no alcanza el valor mínimo de vacíos.

Tabla 39. Tabla resumen del mejor comportamiento respecto a cada mezcla

Mezcla	% de asfalto	Estabilidad (kg)	Flujo (mm)	% de vacíos
MC-0%	6%	554.28	3.68	5.63
MP-5%	6.5%	521.13	2.69	2.63
MP-10%	6%	521.93	2.53	4.25
MP-15%	6.5%	511.29	2.11	4.57

Analizando los resultados las mezclas con mayor sustitución de agregado de PET (MP-15%) fueron las que tuvieron el mejor comportamiento mecánico con una cantidad menor de asfalto (4.5% y 5%), superando en un 54% y 14% a la mezcla control (MC-0%). Esto nos da indicios de que las mezclas MP-15% pueden trabajar de una muy buena manera con menor cantidad de asfalto, sin comprometer su resistencia y flujo.

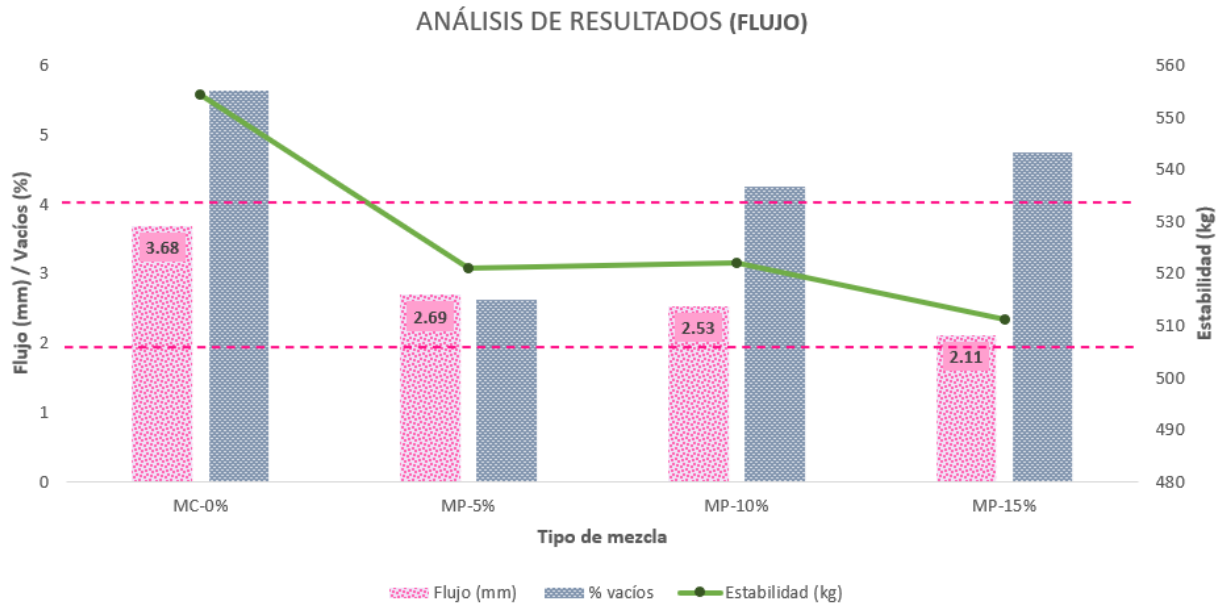


Gráfico 32. Valores de flujo para los mejores comportamientos de todas las mezclas

El gráfico 32 muestra los valores de flujo para cada una de las mezclas, pudiendo observar que todos los valores cumplen. Sin embargo, los valores con mayor cantidad de PET muestran un comportamiento más cercano a un comportamiento rígido.

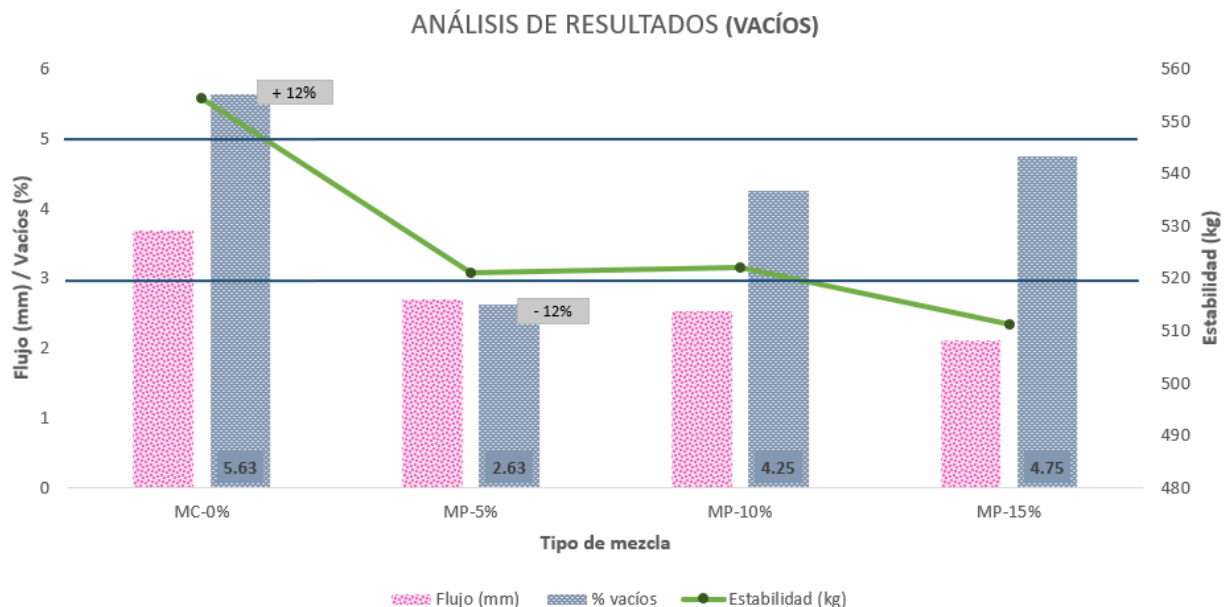


Gráfico 33. Valores de vacíos para los mejores comportamientos de todas las mezclas

De acuerdo con los valores mostrados en el gráfico 33, podemos observar que las primeras mezclas se salen de los rangos establecidos por norma, la MC-0% excede un 12%, mientras que la MP-5% está por debajo en un 12% de igual manera. No son porcentajes muy altos, de esta manera se puede

trabajar en un ajuste para lograr tener los valores dentro de rango como los obtenidos para las mezclas MP-10% y MP-15%.

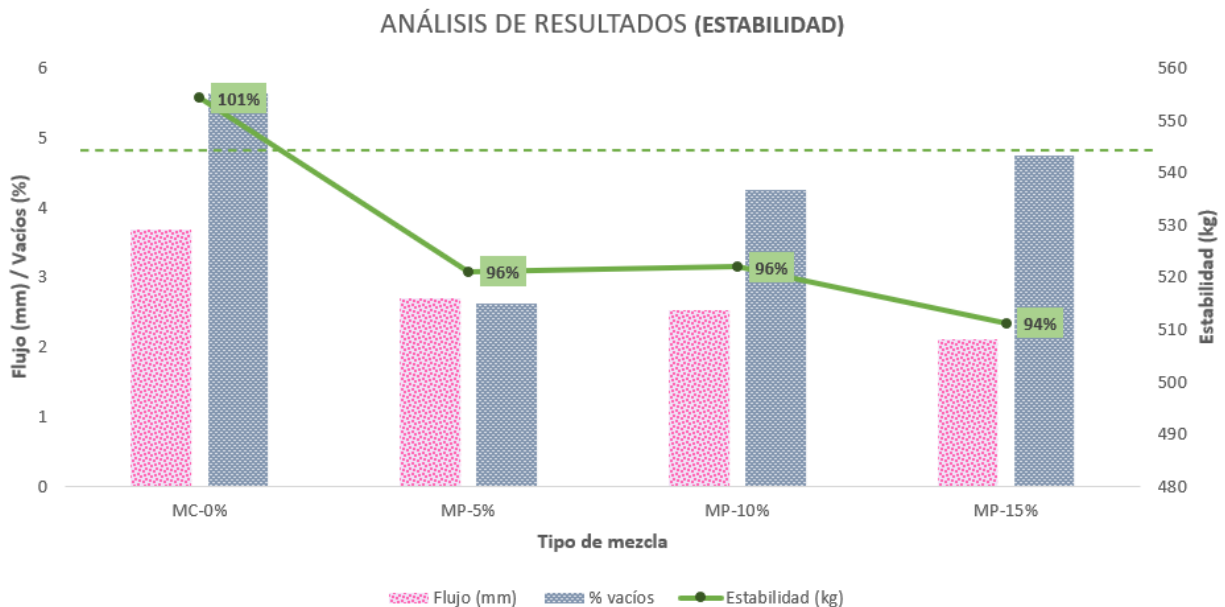


Gráfico 34. Valores de estabilidad para los mejores comportamientos de todas las mezclas

En el gráfico 34 se muestra el comportamiento de estabilidad para todas las mezclas, la línea punteada define el valor de norma para el tránsito diseñada. Si bien es posible observar que solo la MC-0% cumple con el valor en un 101%, las mezclas con sustitución de PET no se encuentran con un comportamiento pobre. Ya que sus resistencias alcanzan alrededor del 95% de lo requerido para este tránsito. El uso de estas mezclas asfálticas podría enfocarse a vialidades con menores niveles de tránsito que ($\Sigma L \leq 1 \times 10^6$), misma que representa un equivalente de 8.2 ton acumulados en un periodo de servicio del pavimento en el carril de diseño no menor de 10 años. Que pueden ser ciclovías, aceras, vías terciarias.

De igual manera se puede realizar el análisis de mejores comportamientos con respecto a los valores obtenidos de estabilidad para cada porcentaje de asfalto evaluado. Considerando de igual manera los parámetros de flujo y % de vacíos. Observamos que los mejores valores de resistencia en los menores porcentajes de asfaltos son aquellos que poseen la sustitución más grande de PET, esto se puede ligar de manera directa a que tienen una mejor adherencia agregado-asfalto al tener mayor cantidad de agregado de PET que tiene susceptibilidad (favorable) a las temperaturas de las mezclas asfálticas. Los valores de flujo se encontraron todos dentro de rango, por lo que se tiene la capacidad de deformación necesaria. Aunque los valores correspondientes a los porcentajes de vacíos de la mayoría de nuestras mezclas no corresponden a los límites establecidos por norma, podemos realizar un análisis de comportamiento, ya que es esperado que a menores cantidades de asfalto los vacíos sean mayores.

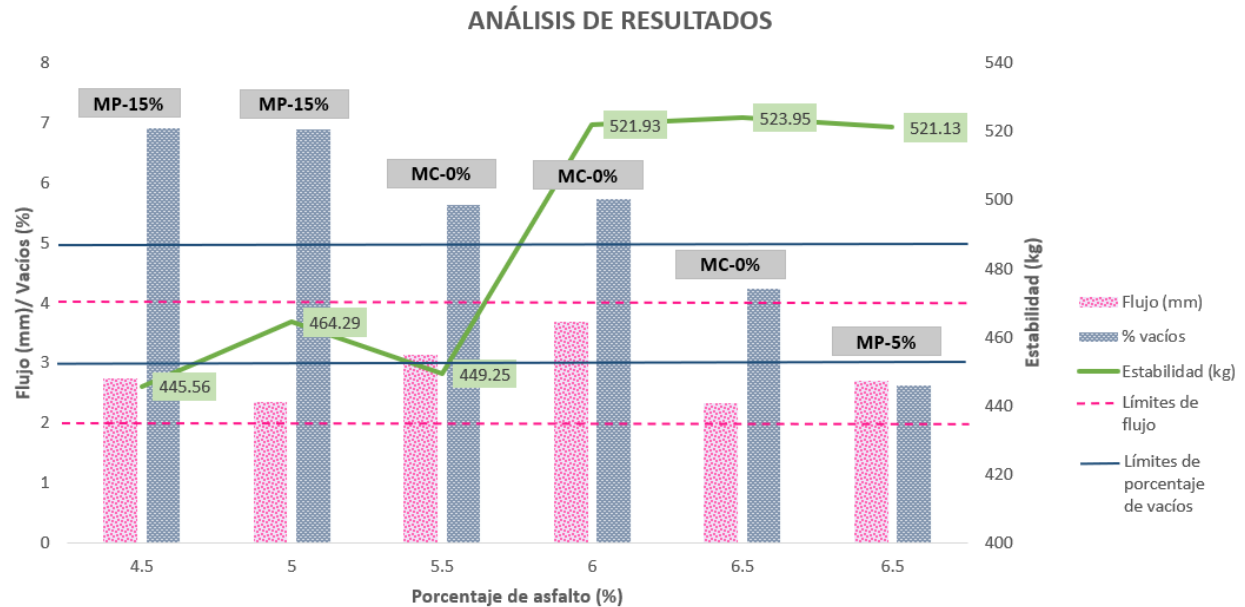


Gráfico 35. Resumen de los mejores comportamientos de las mezclas por porcentaje de asfalto

El gráfico 35 nos indica que las mezclas con sustitución tienen un mejor comportamiento que las mezclas control en los porcentajes de asfalto del 4.5%, 5% y 6.5%. Debido a ello se decide realizar una comparación con la mezcla control para esos 3 porcentajes de asfalto. Obteniendo lo mostrado en el gráfico 36.

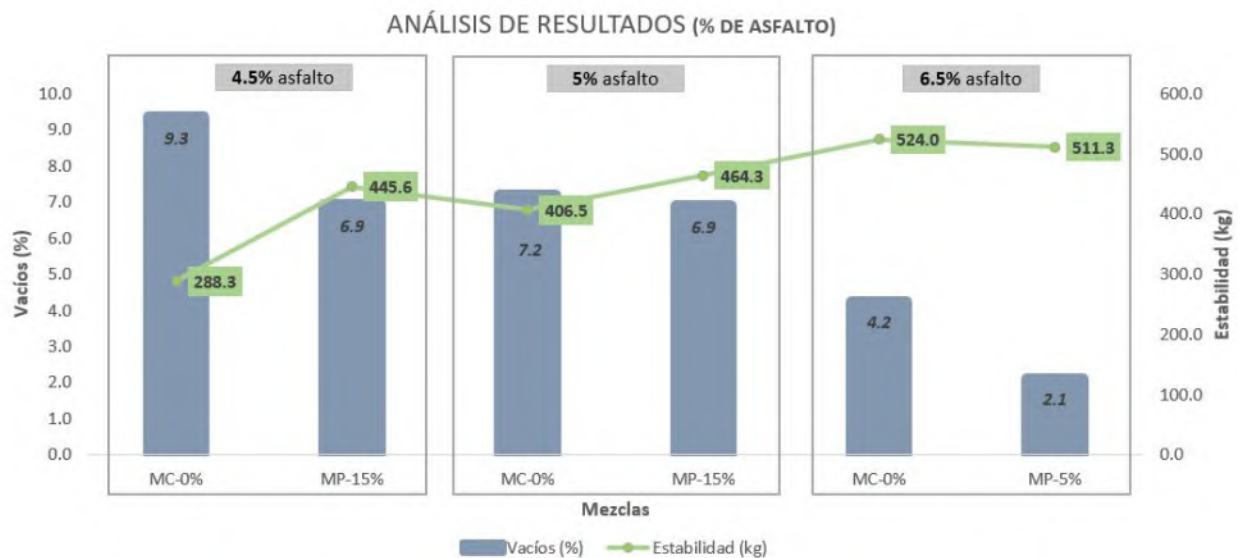


Gráfico 36. Comparación de los valores de sustitución con la mezcla control

Para el porcentaje del 4.5%, la mezcla MP-15% aumenta el valor de estabilidad en un 54% con respecto a la MC-0% y reduce la cantidad de vacíos en un 25% con respecto a la mezcla control.

En el porcentaje del 5% de asfalto, la mezcla MP-15% aumenta la estabilidad un 14% y reduce la cantidad de vacíos a un 4%. Mientras que las mezclas con el 6.5% de asfalto los valores de estabilidad no varían mucho, este valor decrece un 2.4% para la mezcla MP-5% con respecto a la MC-0%. Sin embargo, para los vacíos la mezcla MP-5% logra reducirlos en un 50% con respecto a la mezcla control. Teniendo en cuenta que los valores de flujo cumplen con los límites para todas las mezclas consideradas en el gráfico 36. Con esta gráfica podemos comprobar que la presencia del sustituto de PET ayuda a reducir la cantidad de vacíos comparándolo con una mezcla asfáltica tradicional en hasta un 50% para las mayores cantidades de asfalto.

De acuerdo con los valores y parámetros obtenidos de los comportamientos mecánicos de todas las mezclas, se pueden derivar estrategias considerando los elementos de una matriz FODA, la cual se muestra en el gráfico 37. Dichas estrategias propuestas son:

1. Promover un “ecodiseño” con incentivos fiscales para empresas que usen materiales reciclados.
2. Buscar que zonas turísticas, más aquellas localizadas en costas utilicen en sus ciclovías este tipo de mezclas, promoviendo su compromiso con la reducción de plásticos en cuerpos de agua.
3. Campañas de educación para reducir la resistencia al emplear agregados de reciclados.
4. Crear estándares internacionales de calidad para materiales reciclados.
5. Políticas de responsabilidad extendida del productor para financiar sistemas de recolección.



Gráfico 37. Matriz FODA aplicado a las mezclas asfálticas con sustitución de PET

6 CONCLUSIONES

- Se logro obtener la unión del agregado de PET con el asfalto en todas las mezclas con sustitución
- La presencia del agregado de PET en mezclas con porcentajes menores de asfalto, mejoran los valores de estabilidad y flujo.
- Se logra la reducción de vacíos en la mezcla asfáltica con la sustitución del agregado hecho de PET
- Se reduce la dependencia de los bancos de materiales pétreos con este tipo de agregados reciclados
- Aumentamos el valor a un residuo
- Se reduce la sobre explotación de los bancos de materiales, conservando la flora y fauna del presente
- Se genera el principio de la economía circular en una industria demandante
- Ofrece una alternativa en la reducción de huella de carbono y se asegura el acceso a un derecho ambiente sano

De manera general se mostró un comportamiento bueno entre el agregado de PET y las mezclas asfálticas. Y se puede proponer para investigaciones futuras el emplear otro tipo de granulometría para el diseño de la mezcla, así como un asfalto modificado para aprovechar sus características de adherencia con las del agregado de PET. Además, es viable evaluar mayores porcentajes de sustitución del agregado. Con la finalidad de conocer cuál sería el porcentaje límite para no comprometer los valores de estabilidad y flujo de la mezcla asfáltica.

REFERENCIAS

- Abipet. (2 de Diciembre de 2022). *Reciclagem de PET mantém crescimento, mesmo com os desafios da coleta seletiva*. (admin_abipet, Ed.) Obtenido de <https://abipet.org.br/2022/12/02/reciclagem-de-pet-mantem-crescimento-mesmo-com-os-desafios-da-coleta-seletiva/>
- Amaya Alfonso, O. (2019). *Diseño de la estructura de un Pavimento Flexible Aplicando el Método AASHTO-93, para el corredor Vial comprendido entre la Diagonal 65 – Cai Boston – Cruce vía Yuma en Barrancabermeja, Santander*. Tesis de especialidad , Universidad Militar Nueva Granada , Bogotá.
- ANIPAC. (2021). *2o INFORME DEL ACUERDO NACIONAL PARA LA NUEVA ECONOMIA DEL PLÁSTICO EN MÉXICO*. Ciudad de México.
- ARCE, G. J. (Julio de 2007). Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos. Santiago, Chile.
- ASTM D6927. (2022). *Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. doi:10.1520/D6927-22
- Ben Zair, M. M., Mohd Jakarni, F., Muniandy, R., Hassim, S., Hazoor Ansari, A., & Elahi, Z. (2024, Diciembre). Investigation of the fractionalized polyethylene terephthalate (PET) on the properties of stone mastic asphalt (SMA) mixture as aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 21, 19. doi:10.1016/j.cscm.2024.e03508
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (23 de Noviembre de 2018). *Gobierno de México*. Obtenido de Con-su-mismo plástico: <https://www.gob.mx/conanp/es/articulos/con-su-mismo-plastico?idiom=es#:~:text=M%C3%A9xico%20se%20encuentra%20entre%20los,de%20PET%20por%20cada%20mexicano.>
- ECOCE . (27 de Noviembre de 2019). *México, líder de acopio y reciclaje de plástico PET*. Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/articulos/el-reciclaje-de-pet-en-mexico-es-caso-de-exito>
- ECOCE. (2022). *ECOCE*. Recuperado el 2023, de Cifras y estadísticas. Los datos que debes conocer: https://www.ecoce.mx/cifras_y_estadisticas
- Ecofiltro. (21 de Abril de 2022). *Ecofiltro* . Obtenido de <https://ecofiltro.mx/blogs/news/cuanto-plastico-produce-una-persona-al-ano>
- Enfrin, M., Myszka, R., & Giustozzi, F. (5 de Septiembre de 2022). Paving roads with recycled plastics: Microplastic pollution or eco-friendly solution? *Journal of Hazardous Materials*, 437. doi:10.1016/j.jhazmat.2022.129334

- Giordani, C., & Leone, D. (2002). *Pavimentos*. Universidad Tecnológica Nacional, Ingeniería Civil.
- Hurtado, I. (17 de 12 de 2020). *El rol de la digitalización en la transición hacia una Economía Circular*. Obtenido de Medium.com: <https://medium.com/beyond-strategy/el-rol-de-la-digitalizaci%C3%B3n-en-la-transici%C3%B3n-hacia-una-econom%C3%ADa-circular-4f930a848aa4>
- Instituto Mexicano del Transporte. (2004). *Sistema de Evaluación de Pavimentos Versión 2.0*. Publicación Técnica No 245.
- J. Arratibel, A. (20 de Enero de 2023). *EL PAÍS* . Obtenido de El dilema de México y sus siete millones de toneladas de basura plástica: <https://elpais.com/america-futura/2023-01-20/el-dilema-de-mexico-y-las-siete-millones-de-toneladas-de-plastico-que-acaban-en-la-basura-o-en-el-mar.html>
- LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. (2003). *LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS*.
- LGIREJ. (2007). *LEY DE GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS DEL ESTADO DE CONGRESO DEL ESTADO*.
- Mega Asfaltos. (2023). *Caracterización del Cemento Asfáltico* . Mega Asfaltos S.A. de C.V.
- M-MMP-04-05-007. (2000). *Punto de Inflamación Cleveland en Cementos Asfálticos* . Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- M-MMP-1-02. (2003). Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos. En S. d. Transporte, *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES* (pág. 14). México: Normativa para la Infraestructura del Transporte.
- M-MMP-4-04-001. (2002). *Muestreo de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. IMT, Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- M-MMP-4-04-005. (2025). *Partículas Alargadas y Lajeadas de Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas*. IMT, Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- M-MMP-4-05-006. (2000). *Penetración en cementos y residuos asfálticos*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- M-MMP-4-05-009. (2000). *Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- M-MMP-4-05-011. (2007). *Ductilidad de Cementos Asfálticos y Residuos Asfálticos*. Secretaría de Comunicaciones y Transporte .
- Morseletto, P. (2023). Sometimes linear, sometimes circular: States of the economy and transitions to the future. *Cleaner production* (390), 9. doi:10.1016/j.jclepro.2023.136138

- Movilla Quesada, D., Lagos Varas, M., Raposeiras, A., Muñoz Cáceres, O., Andrés Valeri, V., & Aguilar Vidal, C. (2021). Analysis of Greenhouse Gas Emissions and the Environmental Impact of the Production of Asphalt Mixes Modified with Recycled Materials. *Sustainability*, 13, 15. doi:10.3390/su13148081
- N-CMT-4-04. (2008). Materiales Pétreos para Mezclas Asfálticas. En S. d. Transporte, *CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES* (pág. 10).
- N-CMT-4-05-001. (2005). *CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES* (Vols. Materiales Asfálticos, Aditivos y Mezclas). Secretaría de Comunicaciones y Transporte . Obtenido de <https://normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-001-05.pdf>
- N-CMT-4-05-004. (2018). Calidad de Materiales Asfálticos grado PG. En S. d. Transporte, *Características de los materiales* (pág. 10). CDMX, México: Secretaría de Comunicaciones y Transporte.
- NMX-C-052-ONNCCE. (2012). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-MATERIALES ASFALTICOS-PENETRACION EN CEMENTOS Y RESIDUOS ASFALTICOS-METODO DE ENSAYO*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-164-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado grueso*. México: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2020). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la Densidad Relativa y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Ensayo*. México: ONNCCE.
- NMX-C-183-ONNCCE. (2012). *Industria de la Construcción - Materiales Asfálticos - Punto de Reblandecimiento en Cementos Asfálticos (Anillo y Esfera) - Método de Ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-203-ONNCCE. (2012). *Industria de la construcción - Materiales asfálticos – Determinación de la ductilidad de cementos y residuos asfálticos*. CDMX: ONNCCE.
- NOM-161-SEMARNAT. (2011). *SEMARNAT*.
- NTEA-011-SeMAGEM-RS. (2022). *NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-011-SeMAGEM-RS-2022*. Estado de México.
- ONU. (25 de 09 de 2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- Padilla Rodriguez , A. (2004). *Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista*. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, Enginyeria de Camins, Canals i Ports , Barcelona .

- Páez, A. (07 de 02 de 2022). *CRÓNICA* . Obtenido de https://www.cronica.com.mx/nacional/posiciona-covid-pet-mexico-danos-salud-medio-ambiente-advierten.html#google_vignette
- Parlamento Europeo. (24 de 05 de 2023). Economía circular: definición, importancia y. 5.
- PATLÁN, A. G. (Agosto de 2007). *TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN FISCOQUÍMICAS EN EL RECICLADO DEL POLIETILENTEREFTALATO*. Saltillo, Coahuila, México.
- Plastics Technology México. (01 de 09 de 2023). *Plastics Technology México* . Obtenido de <https://www.pt-mexico.com/columnas/historia-de-los-polimeros-el-pet>
- PNDU. (2022). *Informe Anual del PNUD 2022*.
- Ponce, P. O. (Agosto de 2014). *Introducción a la obtención del asfalto, características y constituyentes*. Obtenido de <https://docplayer.es/127973845-Introduccion-a-la-obtencion-del-asfalto-caracteristicas-y-constituyentes-paula-osorio-ponce-laboratorio-nacional-de-vialidad-agosto-2014.html>
- R Jambeck, J., Geyer, R., Wilcox, C., R Siegler, T., Perryman, M., Andrady, A., . . . Lavender Law, K. (2015, Febrero 13). Marine pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*. doi:10.1126/science.1260352
- Real Academia Española. (2023). *Diccionario de la lengua española*. Obtenido de <https://dle.rae.es/reciclar>
- Red de desarrollo sostenible de Colombia . (2019). Recuperado el 2025, de www.rds.org.co
- Richardson, & Lokensgard. (1999). *Industria del plástico: Plástico Industrial*. Paraninfo.
- Roa Hernández, E. L. (2023). *Estudio del comportamiento de mezclas asfálticas tibias elaboradas con asfalto modificado con hule de neumáticos pretratado y activado*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil, División de posgrados; Maestria en Infraestructura del Transporte en la Rama de las vías terrestres, Morelia.
- Rodriguez, A. P. (2004). *Materiales básicos* . Catalunya.
- Salazar Amaya, M., Mondragón Ornelas , M., & Gómez Valdovinos, M. (2022). *Laboratorio de Materiales Asfálticos*. Manual de laboratorio, Facultad de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales, Morelia.
- Salazar Amaya, Mario; Mondragón Ornelas, Marco Antonio; Salinas Rangel, Emmanuel. (2019). *Manual de pruebas materiales asfálticos*. Morelia.
- Sasidharan, M., Torbaghan, M. E., & Burrow, M. (Mayo de 2019). Using waste plastics in road construction. *Knowledge, evidence and learning for development* , 20.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2004). *Análisis de la influencia de método de compactación en el comportamiento mecánico de mezclas asfálticas*. Publicación técnica no. 255, Instituto Mexicano del Transporte , Querétaro .

- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2004). *ASPECTOS VOLUMÉTRICOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, Querétaro.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2005). *CARACTERIZACIÓN GEOMECAÍNICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS*. Publicación técnica, IMT, División de Laboratorios de Infraestructura, Querétaro.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2016). Materiales asfálticos, aditivos y mezclas. . En S. d. Transporte, *MÉTODOS DE MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES* (pág. 23).
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2020). *Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del nivel de tránsito* . IMT, Querétaro .
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (16 de 04 de 2023). *Duplica Gobierno de México meta de Caminos de Mano de Obra, serán 415: Nuño Lara*. Obtenido de Gob.mx: <https://www.gob.mx/sct/prensa/duplica-gobierno-de-mexico-meta-de-caminos-de-mano-de-obra-seran-415-nuno-lara>
- Secretaría de Energía . (06 de Julio de 2015). *Gobierno de México*. Obtenido de Conoce sobre el proceso de Refinación del Petróleo: <https://www.gob.mx/sener/documentos/conoce-sobre-el-proceso-de-refinacion-del-petroleo-19438>
- SEMARNAT. (2023). *Inventario Nacional de Fuentes de Contaminación Plástica (INFCP)*. SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, Dirección General de Fomento y Desempeño Urbano Ambiental., CDMX.
- Shams Esfandabad, A., Motevalizadeh, S. M., Sedghi, R., Ayar, P., & Asgharzadeh, S. M. (1 de Septiembre de 2020). Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). *Construction and Building Materials*, 259, 10. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120410
- Smith , M., & Collins, J. (1994). *ÁRIDOS NATURALES Y DE MACHAQUEO PARA LA CONSTRUCCIÓN*. España: The Geological Society.
- Unidades tecnológicas de Santander. (2021). *POLIETILENO TEREFTALATO-PET*. Grupo de investigación en ingeniería verde, Santander.
- United Nations Environment Programme. (2022). *A Spotlight on Solutions to End Plastic Pollution in South-East Asia*. SEA of Solutions. Obtenido de <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46856>
- USON. (s.f.). Propiedades y Estudios de los Materiales Asfálticos y Pétreos. Recuperado el 17 de Enero de 2024, de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/11811/capitulo2.pdf>
- Villaroel, L. (27 de Junio de 2016). *Propiedades del asfalto blogspot*. Obtenido de <https://propiedadesdelasfalto.blogspot.com/2016/06/propiedades-del-asfalto-losasfaltos-son.html>
- WBCSD. (2018). *Guía para CEOs sobre la economía circular*. Obtenido de www.wbcsd.org

- Zhang, Z., Liu, H., Ban, X., Liu, X., Guo, Y., Sun, J., . . . Lei, J. (December de 2023). Thermosetting resin modified asphalt: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 10(6), 37. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2023.11.002>
- ZOÉ WATER. (17 de Mayo de 2022). *EL RECICLAJE DE PET Y SU IMPORTANCIA EN MÉXICO*. Obtenido de <https://zoewater.com.mx/revista/el-reciclaje-del-pet-y-su-importancia-en-mexico>

Michelle Montserrat Michelle Montserrat Hernandez ...

Sustitución de agregados pétreos con material de PET en mezclas asfálticas.pdf

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::3117:502412706

Fecha de entrega

23 sep 2025, 8:10 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

23 sep 2025, 8:25 a.m. GMT-6

Nombre del archivo

Sustitución de agregados pétreos con material de PET en mezclas asfálticas.pdf

Tamaño del archivo

4.5 MB

121 páginas

23.348 palabras

134.503 caracteres

17% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 16%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo	Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental	
Título del trabajo	Sustitución de agregados pétreos con agregado de PET en mezclas asfálticas	
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es	Michelle Montserrat Hernandez Pablo	1418315f@umich.mx
Director	Hugo Luis Chávez García	luis.chavez@umich.mx
Codirector	Elia Mercedes Alonso Guzmán	elia.alonso@umich.mx
Coordinador del programa	Salomón Ramiro Vásquez García	mae.cs.ingenieria.ambiental@umich.mx

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción	No	

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español	No	
Traducción a otra lengua	No	
Revisión y corrección de estilo	No	
Análisis de datos	No	
Búsqueda y organización de información	Si	Se empleo la herramienta Deepseek para la organización de datos empleados en la tabla 9 del documento de tesis.
Formateo de las referencias bibliográficas	No	
Generación de contenido multimedia	No	
Otro	No	

Datos del solicitante	
Nombre y firma	Michelle Montserrat Hernandez Pablo
Lugar y fecha	19 de septiembre de 2025, Morelia, Michoacán.