



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

MODIFICACIÓN DE ASFALTO CON PET

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

ASESOR: I.Q. FRANCISCO JAVIER MANDUJANO ORTIZ

PRESENTA:

ALEJANDRO BOLAÑOS ALVARADO



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Contenido

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
OBJETIVOS.....	5
HIPÓTESIS	5
CAPÍTULO 1 ASFALTOS CONVENCIONALES.....	6
1.1 Asfalto convencional.....	6
1.2. Composición de los asfaltos convencionales.....	8
1.2.1 Asfaltenos	8
1.2.2. Maltenos.....	8
1.3. Características de los asfaltos convencionales.	10
1.4. Tipos de asfaltos	11
1.5. Grado de desempeño (PG).....	13
1.6. Restricciones al Empleo.	14
1.7. Transporte y Almacenamiento.....	15
1.8. Asfaltos en México.	16
1.9. Puntos importantes a considerar al utilizar un Asfalto en México.....	17
CAPÍTULO 2 ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO	20
2.1. Polímeros	20
2.2. Copolímeros en bloques	22
2.3. Copolímeros SBS.	23
2.4. Asfalto modificado.....	25
2.5. Principales modificadores del asfalto.....	27
2.6. Estructura de los Asfaltos Modificados.....	29
2.7. Compatibilidad de los Polímeros.	30
2.8. Cambio de Propiedades en el ligante Asfáltico.....	31
CAPÍTULO 3 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....	32
3.1 ¿Qué es el PET?.....	32
3.2. Estructura química del PET	33
3.3. Propiedades físicas del PET	38
3.4. Propiedades Químicas	39

3.5. Resistencia Química del PET	40
3.6. Propiedades Biológicas del PET	43
3.7. Reciclaje de PET en México.	43
3.8. ¿Cómo se recicla el PET?.....	45
3.9. Solución teórica del problema planteado	47
CAPÍTULO 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO.....	48
4.1. Prueba de Penetración.	48
4.1.1. Penetrómetro.....	49
4.1.2. Aguja de penetración	49
4.1.3. Precisión en los resultados.	51
4.2. Temperatura de ablandamiento.	52
4.2.1. Soporte del Anillo	52
4.2.2. Precisión en los resultados.	52
4.3. Índice de penetración.....	55
CAPÍTULO 5 MATERIALES Y RECURSOS EXPERIMENTALES.....	57
5.1. Preparación del Tereftalato de Polietileno (PET) para su utilización en la modificación de asfalto.....	57
5.2. . Modificación de asfalto con PET	58
5.3. Prueba de penetración.....	61
5.4. Punto de reblandecimiento o de fusión.....	63
CAPÍTULO 6 RESULTADOS.....	66
6.1. Concentraciones utilizadas para la modificación.....	66
6.2. Resultados prueba de penetración.....	68
4.3. Resultados Pruebas de punto ablandamiento o de fusión.	76
6.4. Puntos importantes a considerar en la obtención del PET en polvo.....	80
6.5. Cálculo del índice de penetración.....	81
6.6. Nomograma de Heukelom.	82
CONCLUSIONES.....	88
Trabajos citados y Bibliografía.....	90

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS SEGÚN LA NOM N·CMT·4·05·001/05.....	7
TABLA 2 MODIFICADORES DE ASFALTO TIPO I	27
TABLA 3 MODIFICADORES DE ASFALTO TIPO II	28
TABLA 4 MODIFICADORES DE ASFALTO TIPO III	28
TABLA 5 PROPIEDADES DEL PET	39
TABLA 6 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN ALCOHOLES.....	40
TABLA 7 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN ALDEHIDOS	40
TABLA 8 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN HIDROCARBUROS.....	40
TABLA 9 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN HIDROCARBUROS CLORADOS	41
TABLA 10 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN ÁCIDOS.....	41
TABLA 11 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN DISOLVENTES	41
TABLA 12 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN SOLUCIONES ALCALINAS ACUOSAS	42
TABLA 13 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN SOLUCIONES SALINAS	42
TABLA 14 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN OTRAS SUSTANCIAS.....	42
TABLA 15 RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET EN ESTERES.....	42
TABLA 16 CARACTERÍSTICAS DEL ASFALTO DEACUERDO AL IP	56
TABLA 17 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 2%	68
TABLA 18 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 5%	68
TABLA 19 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 10%	69
TABLA 20 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 2% CO-POLÍMERO 1%.....	69
TABLA 21 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 2% CO-POLÍMERO 2%.....	69
TABLA 22 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 5% CO-POLÍMERO 1%.....	70
TABLA 23 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 5% CO-POLÍMERO 2%.....	70
TABLA 24 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 10% CO-POLÍMERO 1%.....	71
TABLA 25 PRUEBA DE PENETRACIÓN ASFALTO PET 10% CO-POLÍMERO 2%.....	71
TABLA 26 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PENETRACIÓN.....	72
TABLA 27 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE PENETRACIÓN CON POLÍMERO SB AL 1%.....	73
TABLA 28 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE PENETRACIÓN CON POLÍMERO SB 2%	74
TABLA 29 TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO PARA MUESTRAS BASE PET/ ASFALTO.....	76
TABLA 30 TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO PARA MUESTRAS PET/ASFALTO/POLÍMERO SB AL 1%.....	77
TABLA 31 TEMPERATURA DE ABLANDAMIENTO PARA MUESTRAS PET/ASFALTO/POLÍMERO SB.....	78
TABLA 32 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN PET/ASFALTO.....	83
TABLA 33 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN PET/ASFALTO/POLÍMERO 1%.....	84

IV

TABLA 34 RESULTADOS DEL ÍNDICE DE PENETRACIÓN PET/ASFALTO/POLÍMERO 2%.....	86
--	----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Regiones geográficas recomendadas para la utilización de cementos asfálticos grado PG según la NOM n-cmt-4-05-004/05	14
Ilustración 2 Clasificación de los polímeros.	20
Ilustración 3. Cadena del copolímero SBS.....	23
Ilustración 4. Símbolo de reciclaje del PET	32
Ilustración 5. Fórmula estructural del PET	35
Ilustración 6. Grados de PET.....	35
Ilustración 7. Fórmula estructural del PET	36
Ilustración 8. Fórmulas estructurales de las moléculas de Etileno y Paraxileno.....	36
Ilustración 9. Fórmula estructural de la molécula de Tereftáto y Etileno.....	37
Ilustración 10. Fórmula estructural de la molécula del Ácido Tereftálico	37
Ilustración 11. Fórmula estructural de la molécula de Etilenglicol.....	38
Ilustración 12. Aguja del Penetrómetro.....	50
Ilustración 13. Esquema de la aguja penetrando el asfalto.....	51
Ilustración 14. Dimensiones del anillo para la prueba de ablandamiento.	53
Ilustración 15. Arreglo para la prueba de ablandamiento.	53
Ilustración 16. Arreglo y dimensiones para la prueba de ablandamiento.....	54
Ilustración 17. Arreglo para la modificación polimérica con PET.....	60
Ilustración 18. Modificación en curso.	60
Ilustración 19 Penetrómetro, Ilustración 20 aguja de penetración.	62
Ilustración 21. Equipo prueba de ablandamiento.....	64
Ilustración 22. Asfaltos modificados sometidos a la prueba de ablandamiento.	65
Ilustración 23. Prueba de ablandamiento finalizada.	65
Ilustración 24. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET	72
Ilustración 25. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET-Co-polímero 1%	73
Ilustración 26. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET-Co-polímero 2%	74
Ilustración 27. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET.....	76
Ilustración 28. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET y polímero SB al 1%.....	77
Ilustración 29. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET y polímero SB al 1%.....	78
Ilustración 30. PET en polvo.....	80
Ilustración 31. Nomograma de Heukelom, lectura hecha a 40 °C como temperatura de ablandamiento y 200 como penetración a 25 °C.	82
Ilustración 32. Variación del IP con respecto al porcentaje de PET adicionado.	83
Ilustración 33. Variación del IP con respecto al % de PET y Co-polímero SB 1% adicionado.	84

Ilustración 34. Variación del IP con respecto al % de PET y Co-polímero SB 2%
adicionado. 86

RESUMEN

En el presente trabajo de TESIS se realizó un estudio acerca del comportamiento termo-mecánico de un asfalto al ser sometido a una modificación polimérica.

Para la realización del estudio experimental se utilizó el asfalto PG64-22 obtenido de la Refinería de Salamanca, Guanajuato utilizando como polímero modificador al tereftalato de polietileno (PET) en las siguientes concentraciones: 2%, 5% y 10%. Los asfaltos modificados fueron caracterizados por medio de dos pruebas, la primera se denomina prueba de penetración y la segunda es la prueba de temperatura de ablandamiento o de fusión, dichas pruebas están reportadas en las normas ASTM D3686, D5 y D1084,

La modificación de los asfaltos se llevó a cabo por medio de un mezclado en caliente el cual opera a una temperatura de 180 °C a presión atmosférica con una velocidad de agitación de 250 RPM y durante un tiempo de 3 horas.

Para lograr una buena integración de la mezcla PET/ ASFALTO se agregó un segundo polímero de cadenas de estireno-butadieno, esto con el fin de lograr una estabilidad en la mezcla, utilizado en concentraciones de 1 y 2% para cada una de las 3 concentraciones de PET a estudiar.

Las caracterizaciones de las muestras que se realizaron con base a las normas ASTM arrojaron que: la variación en las concentraciones de polímero es directamente proporcional tanto para la prueba de ablandamiento y para la prueba de penetración.

INTRODUCCIÓN

México es un país rico en petróleo, la refinación de este recurso genera diversos productos de alto valor agregado y de gran utilidad, los procesos de refinación generan asfalto como subproducto pesado el cual debe ser comercializado. El principal uso del asfalto es como adherente en la aplicación de carpetas de rodamiento vehicular. Nuestro país cuenta con una extensa red carretera, pero esta infraestructura requiere mantenimiento y debe ser ampliada, es decir, tanto grandes y pequeñas ciudades como comunidades aisladas, necesitan la construcción de carreteras que les permitan impulsar su desarrollo social y económico. Los asfaltos convencionales derivados del petróleo mexicano presentan grandes ventajas, pero es deseable mejorar las propiedades que extiendan su vida útil o de servicio.

Este procedimiento para la modificación de asfaltos sirve para crear materiales bituminosos más resistentes. Las concentraciones se designan de acuerdo al uso que se le vaya a dar al material, por ejemplo en un 2% en peso de polímero nos quiere decir que este va a ser utilizado en pavimentos y en una concentración de 10% el material será utilizado como impermeabilizante, esta concentración puede variar de acuerdo a la región del país donde se vaya a hacer uso del mismo, y esto depende de las condiciones climáticas presentes en los estados y de su carga vehicular.

Por otra parte, la protección ambiental impone el reúso de materiales como los polímeros, a fin de evitar que sean contaminantes del ambiente y aprovechar los recursos empleados para su generación original. La investigación para el mejoramiento de las propiedades de desempeño de los asfaltos ha demostrado que los polímeros pueden ser buenos modificadores.

De acuerdo a la SEMARNAT en México se generan poco más de 42 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos al año y solo se recicla cerca del 10 por ciento y de este total de los residuos urbanos, solo el 0.3 por ciento es de tereftalato de polietileno (PET), puede que a primera impresión no sea mucho lo que se puede llegar a reciclar de PET pero debido a los cambios climáticos que

sufre el planeta hoy en día, cualquier tipo de ahorro de energías fósiles es benéfico para la economía y el bienestar ambiental del país.

La recuperación de envases de PET a la fecha es cerca del 60 por ciento del consumo nacional lo que resulta en un 40 por ciento más por aprovechar. Esto significa que se ahorran cerca de 8.9 millones de barriles de petróleo que equivalen a cerca de 3 días de producción en PEMEX o bien, mas de 70 millones de metros cúbicos ahorrados de espacios en rellenos sanitarios y que, a nivel ambiental quiere decir que se dejan de expulsar cerca de 6.6 millones de toneladas de CO₂ equivalente a las emisiones que captan 556 millones de Árboles¹.

En este trabajo se estudiarán las propiedades termodinámicas que presentan los asfaltos modificados con tereftalato de polietileno (PET), lo que resulta de gran utilidad dado que es una materia prima 100% reciclable y de bajo costo.

Este mismo tipo de asfalto fue utilizado en trabajos anteriores que se han realizado en el laboratorio de investigación de Ingeniería Química del conjunto E en Ciudad Universitaria para que de esta forma puedan ser comparados y así obtener información complementaria con el propósito de encontrar la mejor mezcla de asfalto/ polímero posible.

¹ (Anderson, 2015)

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los asfaltos convencionales tienen características importantes que les proporcionan gran eficiencia para su aplicación en pavimento de carreteras. Sin embargo, en zonas de la República Mexicana donde están expuestos a condiciones climáticas extremas (mucho frío, mucho calor, lluvias), así como una carga vehicular muy alta, se presentan problemas como resquebrajamiento a bajas temperaturas y fluencia del material a altas temperaturas, incrementándose los costos de mantenimiento y aumentando la probabilidad de accidentes relacionados con el tránsito vehicular.

Lo cual nos lleva a realizar el siguiente cuestionamiento: ¿Hasta qué punto la modificación de asfaltos con tereftalato de polietileno puede llegar a ser útil para mejorar sus características termo-mecánicas y ayudar a aumentar su vida de servicio disminuyendo su susceptibilidad térmica?

Delimitación del problema

Se llevará una investigación a nivel laboratorio para describir el comportamiento termo-mecánico del asfalto PG64-22 proveniente de la refinería de Salamanca Guanajuato. Modificando con tereftalato de polietileno reciclado, a fin de identificar la posibilidad de empleo de estos asfaltos en función de las características termo-mecánico obtenido, particularizando la atención hacia la aplicación en carpetas de rodamiento vehicular.

OBJETIVOS.

- a) Modificar el asfalto PG64-22 con PET triturado por el método de mezclado en caliente en concentraciones de 2%, 5% y 10% de % peso/peso de PET.
- b) Obtener resultados considerables al realizar la modificación del asfalto PG64-22 con PET en comparación del asfalto convencional sin modificar.
- c) Comparar la eficiencia del mejoramiento termo-mecánico del asfalto PG64-22 con PET en relación a la tabla de clasificación de la norma ASTM D35
- d) Obtener una modificación de asfalto-PET que cumpla con los estándares normativos para su utilización como pavimento.

HIPÓTESIS

Hipótesis conceptual.

De acuerdo al marco teórico seleccionado, la modificación de asfalto con tereftalato de polietileno ayudará a mejorar su comportamiento termo-mecánico, dadas sus características químicas y físicas presentes en tereftalato de polietileno (PET).

Hipótesis estadística.

Se espera durante la experimentación que entre mayor cantidad de tereftalato de polietileno se utilice para su modificación, mayor será su resistencia termo-mecánica.

Hipótesis Nula.

Ho 1. Se puede presentar que durante la experimentación entre mayor cantidad de tereftalato de polietileno se utilice para su modificación menor será su resistencia termo-mecánica.

Ho 2. Se puede presentar que no exista ninguna relación en el incremento o la disminución de tereftalato de polietileno en la modificación del asfalto.

CAPITULO 1 ASFALTOS CONVENCIONALES

Marco teórico de referencia.

Con este marco teórico de referencia se tratará de dar una explicación del problema planteado a partir del conocimiento científico acumulado. En estos primeros capítulos se hablará a cerca de lo que es: un asfalto, el tereftalato de polietileno y la modificación polimérica, con el fin de la totalidad de comprensión del lector.

1.1 Asfalto convencional.

El asfalto convencional o virgen es un cemento asfáltico, el cual se obtiene a partir del proceso de destilación del petróleo el cual constituye la parte pesada del proceso, es un material bituminoso (viscoelástico) de color negro, constituido por Asfáltenos, resinas y aceites (Maltenos), elementos que proporcionan las características de consistencia, aglutinación y ductilidad; es sólido o semisólido y tiene propiedades cementales a temperaturas ambientales normales y al calentarse se ablanda gradualmente hasta alcanzar un estado líquido. Los asfaltos tienen dos orígenes: el natural y el derivado del petróleo.

Además, es un material de los llamados termoplásticos, el cual es muy complejo desde el punto de vista químico ya que es obtenido como el residuo en el proceso de refinación del petróleo crudo. Sin embargo, éste es un material de suma importancia para la industria de la construcción por sus propiedades de consistencia, adhesividad, impermeabilidad y durabilidad, y sobre todo por el bajo costo ya que es el residuo en el proceso de refinación del petróleo.

Según las normas oficiales mexicanas sobre asfaltos, estos tipos de materiales se emplean en la elaboración de carpetas, morteros, riegos y estabilizaciones, ya

sea para aglutinar los materiales pétreos utilizados, para ligar o unir diferentes capas del pavimento; o bien para estabilizar bases o sub-bases².

También se pueden usar para construir, fabricar o impermeabilizar otras estructuras, tales como algunas obras complementarias de drenaje, entre otras.

Los materiales asfálticos se clasifican en cementos asfálticos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados, dependiendo del vehículo que se emplee para su incorporación o aplicación, como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 1. Clasificación de los materiales asfálticos según la NOM N-CMT-4-05-001/05

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 sub-bases y bases hidráulicas.

² (Oficial, sct.gob, 2012)

1.2. Composición de los asfaltos convencionales.

El asfalto es considerado un sistema coloidal complejo de hidrocarburos, en el cual es difícil establecer una distinción clara entre fase continua y dispersa. Las primeras experiencias para descubrir su estructura, fueron desarrolladas por Nellensteyn en 1924, cuyo modelo fue mejorado más tarde por Pfeiffery Saal en 1940, en base a limitados procedimientos analíticos.

La clasificación para los grupos de constituyentes que componen el asfalto se enlista a continuación:

1.2.1 Asfaltenos

Son compuestos de alto peso molecular, principalmente de naturaleza aromática con pocas ramificaciones, se encuentran en sus cadenas en cantidad apreciables elementos como oxígeno, azufre y nitrógeno.

Los asfaltenos le dan la característica de dureza al asfalto y se encuentran disueltos en los maltenos.

1.2.2. Maltenos

Los maltenos son un grupo de compuestos que constituyen una parte importante de los asfaltos y se puede decir que los maltenos están ligados con las propiedades elásticas de los asfaltos. Los compuestos presentes en los maltenos son:

a) Resinas

Son compuestos muy polares de bajo peso molecular de colores marrones o marrón claro, sólidos o semisólidos, solubles en n-heptano y, al igual que los asfaltenos, son compuestos de carbón, hidrógeno y cantidades menores de nitrógeno, oxígeno y azufre. Las resinas son materiales muy adhesivos y actúan como dispersantes o peptizantes de los asfaltenos.

b) Aromáticos

Los aromáticos constituyen entre el 40 y 65 % de la composición total de los asfaltos, son las fracciones de menor peso molecular en la estructura de los asfaltos, representan la mayor proporción de los dispersantes de los asfaltenos peptizados³.

En resumen como se ha mencionado, el asfalto puede ser descrito como una mezcla compleja de hidrocarburos, por lo que su análisis químico se reporta en términos de dos fracciones principales; la primera se refiere a la fracción pesada, denominada asfaltenos cuyo peso molecular se encuentra entre 4000 y 7000, y la fracción ligera denominada como maltenos con pesos moleculares de 700 a 4000. A su vez la parte malténica puede subdividirse en tres fracciones principales siendo éstas las siguientes: parafinas con pesos moleculares de 600 a 1000, resinas de 1000 a 2000 y aceites aromáticos de 2000 a 4000. Los constituyentes del asfalto interactúan entre sí formando un fluido complejo, el cual exhibe un complicado comportamiento viscoelástico. El comportamiento del asfalto depende de su composición química, la cual depende a su vez de la fuente de procedencia y del proceso de refinación.

La estructura cristalina de la parafina sólida ocasiona un endurecimiento mayor en el asfalto; a temperaturas más elevadas la parafina se licua, lo que ocasiona una variación sensible en las viscosidades del asfalto.

Cuando el asfalto es disuelto en n-heptano, los materiales duros son precipitados (asfaltenos), existen otras fracciones asfálticas precipitadas por otros solventes, pero esta es la mejor manera de distinguir a estos materiales como insolubles en n-pentano.

³ (Abraham, 2006)

1.3. Características de los asfaltos convencionales.

El asfalto es un material anisotrópico y discontinuo; este material está considerado como un material coloidal, formado por micelas de tamaños cercanos a la micra (fase asfáltica), las cuales están suspendidas en una fase aceitosa de alta viscosidad (fase malténica). La micro-estructura del asfalto queda definida por la cantidad de micelas (o sea la fracción de asfaltenos respecto a los maltenos), la distribución de tamaños de las partículas que forman la fase discreta y por las interacciones físicas y químicas entre ellas. Estas interacciones son las responsables de que el asfalto forme una red tridimensional más o menos desarrollada, la cual determina tanto su naturaleza elástica como viscosa.

El asfalto es muy susceptible a los cambios de temperatura y sufre envejecimiento por intemperismo para largos tiempos de exposición; es también afectado por la oxidación y la foto-degradación. Respecto a sus propiedades mecánicas éstas son muy pobres ya que es quebradizo a bajas temperaturas y fluye a temperaturas un poco arriba de la temperatura ambiente; tiene además una baja recuperación elástica. Todos estos factores limitan ampliamente su rango de utilidad.

Por estas razones este material tiene que ser modificado para mejorar substancialmente sus propiedades. Una de las formas de mejorar las propiedades del asfalto es oxidándolo, ya que este procedimiento aumenta su peso molecular y su viscosidad, reduciendo sus propiedades de flujo; sin embargo, estudios diversos han mostrado que la modificación con polímero es preferible si se quieren mejorar substancialmente sus propiedades mecánicas, en especial su recuperación elástica, aunque el costo de este procedimiento es considerablemente mayor.

1.4. Tipos de asfaltos

La mayor parte de los asfaltos producidos son utilizados en trabajos de pavimentación, destinándose una producción menor para aplicaciones industriales, como impermeabilizante, aislantes, etc. A continuación se enlistan los tipos de asfaltos existentes.

a) *Cemento Asfáltico*: Los cementos asfálticos son preparados especialmente para el uso en la construcción de pavimentos asfálticos. Es un material para su aplicación en trabajos de pavimentación, pues aparte de sus propiedades aglomerantes e impermeabilizantes, posee características de flexibilidad, durabilidad y alta resistencia a la mayoría de los ácidos, sales y álcalis.

Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

b) *Asfaltos cortados*: Los asfaltos cortados, también conocidos como asfaltos diluidos o cut-baks, resultan de la ductilidad del cemento asfáltico con destilados del petróleo.

- Los diluyentes utilizados funcionan como vehículos, resultando productos menos viscosos que pueden ser aplicados con temperaturas más bajas.
- De acuerdo con el tiempo de curado determinado por la naturaleza del diluyente utilizado, los asfaltos cortados se clasifican en:

- ❖ *RC – Asfaltos cortados de curado rápido.*
- ❖ *MC – asfaltos cortados de curado medio.*
- ❖ *SC – asfaltos cortados de curado lento.*

Sigla normalmente seguida de un número que indica su grado de viscosidad⁴.

c) *Emulsiones asfálticas*: Son dispersiones de cemento asfáltico en fase acuosa, con estabilidad variable. El tiempo de quiebre y de viscosidad de las emulsiones dependen, entre otros factores, de la cantidad y calidad de los agentes emulsificantes.

- La cantidad de emulsificantes y aditivos químicos utilizados varía generalmente de 0.2% a 5% y la cantidad de asfalto es del orden del 95%.
- El color de las emulsiones asfálticas antes del quiebre es marrón y después del quiebre negro, constituyendo esta característica un elemento auxiliar para la inspección visual y constatación rápida de la buena condición del producto. Las partículas de asfalto dispersas en la emulsión son visibles al microscopio variando de su tamaño de 0.1 a 10 micrones.
- Las emulsiones asfálticas se clasifican según el tipo de carga de la partícula y su tiempo de quiebre.
- En cuanto a la carga de partícula, pueden ser: *Catiónicas* y *Aniónicas*.
- Y en cuanto al tipo de quiebre: *Quiebre rápido*, *Quiebre medio* y *Quiebre lento*.

d) *Asfaltos oxidados*: Los asfaltos oxidados o soplados, son asfaltos calentados y sometidos a la acción de una corriente de aire con el objeto de modificar sus características normales, a fin de adaptarlos para aplicaciones especiales.

⁴ (N., Emulsiones Asfálticas, 2000)

- Los asfaltos oxidados son utilizados generalmente para fines industriales como impermeabilizantes, película protectora, etc.
- El proceso de oxidación produce en el asfalto las siguientes modificaciones físicas principales: *aumento de peso específico y consistencia, disminución de ductilidad y disminución en la susceptibilidad térmica.*

1.5. Grado de desempeño (PG).

El grado de desempeño o Grado PG es el rango de temperaturas máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente.

El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil.

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius. Las temperaturas máximas y mínimas se extienden tanto como sea necesario con incrementos estandarizados de seis (6) grados. Sin embargo, generalmente las temperaturas máximas se consideran de sesenta y cuatro (64) a ochenta y ocho (88) grados Celsius y las mínimas, de menos cuarenta (-40) a menos veintidós (-22) grados Celsius.

Los grados PG pueden ser tantos y tan amplios como la gama de temperaturas que se registran en el país, sin embargo, para fines prácticos, es recomendable seleccionar un cemento asfáltico que corresponda a uno de los tres (3) grados PG que se indican en la Ilustración 1, de acuerdo con el clima de la zona geográfica donde se le pretenda utilizar, de entre las zonas en que se ha dividido la República Mexicana que se muestran en la misma Ilustración, pero considerando que dentro de una misma zona, las condiciones del clima en un área determinada pueden variar, lo que se debe tomar en cuenta para elegir el Grado PG adecuado.

La temperatura máxima del Grado PG seleccionado según el clima, se ajusta de acuerdo con la intensidad del tránsito esperada en términos del número de ejes equivalentes de ocho coma dos (8,2) toneladas, acumulados durante un periodo de servicio del pavimento de diez (10) años (ΣL_{10}) y de acuerdo con la velocidad de operación⁵.

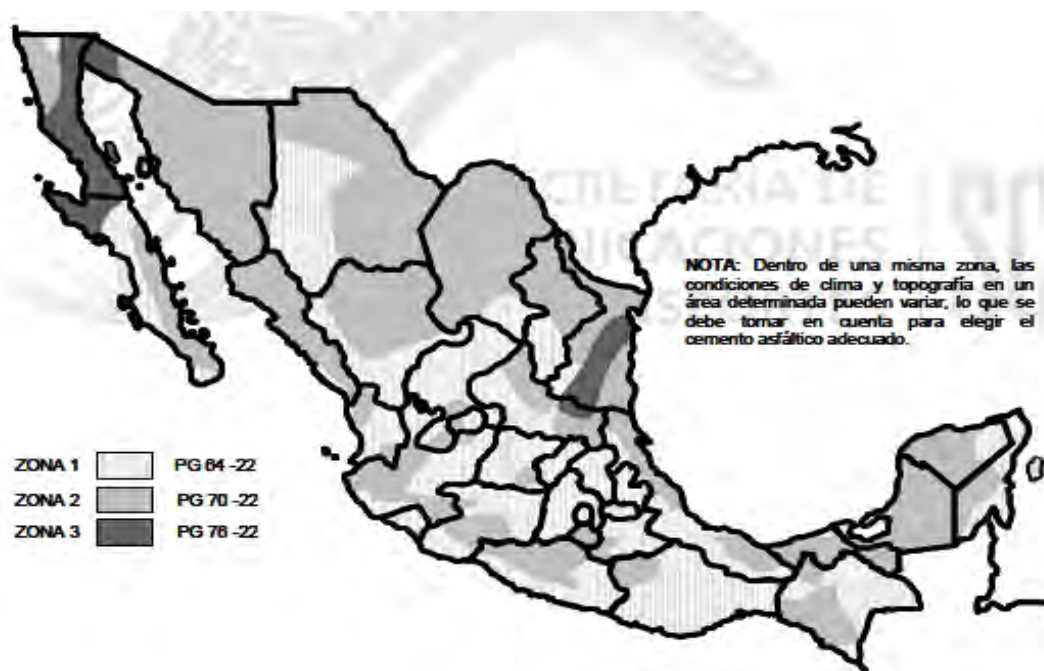


Ilustración 1. Regiones geográficas recomendadas para la utilización de cementos asfálticos grado PG según la NOM n-cmt-4-05-004/05

1.6. Restricciones al Empleo.

En los tratamientos superficiales existen restricciones en cuanto al empleo de los cementos asfálticos:

- I. No deben ser calentados sobre 180 °C. siendo esta la temperatura ideal obtenida por la relación temperatura – viscosidad.
- II. No se debe aplicar con tiempo amenazante de lluvia, temperatura ambiente inferior a 10 °C. y en superficies húmedas.
- III. Debe evitarse el recalentamiento del producto y calentamientos locales⁶.

⁵ (Oficial, Normas IMT MX, 2005)

⁶ (Institute, 2008)

1.7. Transporte y Almacenamiento.

- El transporte de cemento asfáltico puede efectuarse en tambores o a granel.
- En el caso de tambores su entrega está limitada a obras de pequeña envergadura.
- El transporte a granel puede efectuarse en camiones o en vagones ferroviarios; el más común es en camiones.
- Tanto el transporte como el almacenamiento a granel, requieren calentamiento, existiendo los siguientes procesos:

-Serpentines calentados con vapor de agua.

-Serpentines calentados por circulación de aceite.

-Serpentines calentados por gases de combustión.

- El calentamiento a temperaturas elevadas por un tiempo prolongado, altera sensiblemente la constitución del asfalto, modificando sus propiedades. Se recomienda mantener los estanques de almacenamiento a temperaturas no superiores a 180 °C.
- El calentamiento nunca debe efectuarse a través de llama directa debiendo, usarse preferentemente, calentamiento a través de serpentines al interior de los estanques. En la operación de carga y descarga de asfalto a granel, es necesario verificar si los estanques están suficientemente limpios, a fin de eliminar cualquier grado de contaminación.

1.8. Asfaltos en México.

Anteriormente se tenía únicamente dos refinerías que producen asfaltos en México, que eran las de Salamanca, Guanajuato, y Cd. Madero, Tamaulipas, que producía asfalto No. 6 de 85 a 100 de mm. de penetración, el cual se utilizaba en toda la República Mexicana sin tomar en cuenta las condiciones del lugar donde se iba a usar, por otra parte los crudos de dichas refinerías eran de diferentes calidades con contenidos diferentes de asfaltos, resinas, aceites, parafinas, etc., dando diferentes viscosidades, durabilidad, punto de reblandecimiento; comportándose diferente a la oxidación y envejecimiento, lo que redundaba en diferente comportamiento de las carpetas de mezcla asfáltica, aunado a que este tipo de asfalto no era el idóneo para la mayoría de los climas de la República Mexicana.

Actualmente se tienen cuatro refinerías en producción de cemento asfáltico con una capacidad superior a los 60,000 barriles diarios y produciendo diferentes tipos de asfalto acorde a las necesidades del país y cumpliendo las normas actuales de ASTM D-3381 que los clasifica de acuerdo a la viscosidad absoluta a 60° C.

Los asfaltos que produce PEMEX de acuerdo a sus refinerías son las siguientes:

- a) Refinería de Cd. Madero Tamaulipas., con producción de asfaltos AC-20 y AC-30 con los cuales cubren su área de influencia y exporta ambos asfaltos.
- b) Refinería de Salamanca, Guanajuato., que produce AC-10 equivalente a C.A. No. 6 para consumo nacional de la zona centro del País.
- c) Refinería de Salina Cruz, Oaxaca., asfalto AC-20 para consumo de Sureste del País.
- d) Refinería de Cadereyta, Nuevo León, con producción de AC-20 para el Norte del País y exportación al Sur de los Estados Unidos.
- e) Próximamente la refinería de Tula, Hidalgo., empezara a producir asfalto AC-20 para consumo del Centro Norte del País⁷.

⁷ (Rafael, 2008)

Sin embargo, se tienen problemas en las refinerías sobre todo en la de Salamanca, Guanajuato., con relación a algunos aspectos de homogeneidad, en las pruebas de penetración, ductilidad y punto de reblandecimiento, aun cuando en el resto de los ensayos cumplen, así como en la reología SHRP (Metodología de caracterización del Laboratorio de Ligantes Asfálticos y Tecnología).

1.9. Puntos importantes a considerar al utilizar un Asfalto en México.

Una gran parte de la mala utilización de los asfaltos se debe a las siguientes causas:

- a) El uso de un solo asfalto para todos los climas y para todas las condiciones de tránsito, cargas y velocidad.
- b) Las heterogeneidades de los asfaltos que se producen en las refinerías en que la producción daba variabilidades desde AC-2.5 hasta AC-20 indistintamente.
- c) Tener en cuenta que existen distintos tipos de asfaltos y que las condiciones de diseño cambian para cada una de ellas.
- d) La falta de normas de calidad⁸ que condicionen la calidad de un asfalto de acuerdo al comportamiento que deben tener en el campo de utilización y no los de métodos de ensaye que se refieren a temperaturas para su manejo durante los procesos de refinación, transporte, almacenamiento y elaboración de la carpeta asfáltica. Dado que su objeto era clasificarlos, pero poco informaban sobre su calidad ya que los ensayos de penetración, punto de reblandecimiento, ductilidad, viscosidad, solubilidad y punto de inflamación son de dudosa importancia como distintivo de calidad.
- e) La poca o nula relación que existe en la homogeneidad de la química del asfalto en relación al comportamiento del asfalto dentro de la estructura del pavimento.

⁸ (transportes, 2012)

- f) Los asfaltos son muy susceptibles a los cambios de temperatura y sobre todo su comportamiento reológico a las temperaturas de trabajo de los pavimentos de menos 40 °C a más 80 °C, dado que no se comporta como un líquido Newtoniano, si no que tiene comportamiento de viscoelástico a pseudoplástico según el caso.
- g) El rango de viscoelasticidad de los asfaltos para que tenga buen comportamiento es limitado, por lo que en climas extremos con gradientes de temperatura del pavimento mayores a los 70 °C u 80 °C se tendría que ampliar el rango de trabajo para permitir que trabaje a altas y bajas temperaturas.

Para poder adecuar el asfalto a una correcta utilización se debe tener en cuenta lo siguiente:

- a) Determinar los rangos de temperatura del pavimento a que va estar sometido tanto en época de calor como en época de invierno.
- b) Tomar en cuenta la intensidad de lluvias, los vientos dominantes, así como la humedad ambiente, factores que afectan la durabilidad y el grado de oxidación de los asfaltos, la altitud y la latitud los cuales influyen de manera importante en el clima del sitio a estudiar⁹.
- c) Se deben obtener las condiciones de esfuerzo a que van a estar sometidos, producto del volumen de tránsito, tipo de carga aunado a la vida útil esperada en el diseño.
- d) Determinar que tipo de pruebas de asfaltos son las correctas para que durante el tiempo de utilización de la mezcla, tenga resistencia a la fatiga, a la deformación, al envejecimiento, a los efectos de temperatura en climas fijos, a la fragilidad por rigidez, así como a la deformación permanente.
- e) Aun cuando no está bien definido por las variables químicas del asfalto, existen variaciones en el comportamiento y reacción con diferentes cementos asfálticos, respecto al pétreo comportamiento que es difícil de medir químicamente, pero que puede ser detectado por pruebas físicas en

⁹ (Hodgson, 2001)

las mezclas, este fenómeno también se presenta cuando se utilizan asfaltos modificados por lo que se deberá tener cuidado al diseñar la mezcla, tanto del asfalto como de éste con el petróleo.

- f) Se deberá tener en cuenta la forma de transporte, en virtud de que el asfalto es muy susceptible de contaminarse con otros productos como son: diésel, combustibles, rebajados, etc., dado que un pequeño porcentaje de estos productos puede variar la calidad de un asfalto¹⁰.

¹⁰ (Groover, 2005)

CAPITULO 2 ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO

En este capítulo se expondrá información importante relacionada con la modificación de asfaltos con polímeros contemplando los puntos más importantes de la teoría de modificación polimérica.

2.1. Polímeros

Un polímero es una gran molécula construida por la repetición de pequeñas unidades químicas simples. En algunos casos la repetición es lineal, de forma semejante a como una cadena la forman sus eslabones. En otros casos las cadenas son ramificadas o interconectadas formando retículos tridimensionales. La unidad repetitiva del polímero es usualmente equivalente o casi equivalente al monómero, o material de partida del que se forma el polímero.

La longitud de la cadena del polímero viene especificada por el número de unidades que se repiten en la cadena. Este es llamado grado de polimerización (DP). El peso molecular del polímero es el producto del peso molecular de la unidad repetitiva por el grado de polimerización. La mayoría de los altos polímeros útiles para plásticos, cauchos o fibras, tienen pesos moleculares entre 10,000 y 1, 000,000.

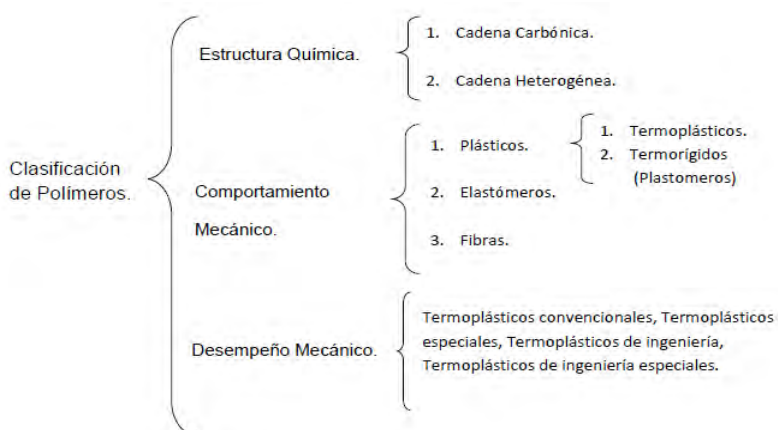


Ilustración 2 Clasificación de los polímeros¹¹.

¹¹ (transportes, 2012)

Los procesos de polimerización fueron divididos por dos grandes grupos conocidos como polimerización de condensación y de adición o, polimerización de reacción por etapas y de reacción en cadena.

La polimerización de condensación o de reacción por etapas es por completo análoga a la condensación de los compuestos de bajo peso molecular. En la formación del polímero la condensación tiene lugar entre dos moléculas poli-funcionales para producir una molecular poli-funcional mayor, con la posible eliminación de una molécula pequeña como el agua. La reacción continua hasta que casi la totalidad de uno de los reactivos ha sido utilizada; se establece un equilibrio que puede desplazarse a voluntad a altas temperaturas controlando las cantidades de los reactivos y de los productos.

La polimerización por adición o de reacción en cadena implica reacciones en cadena en las que el portador de la cadena puede ser un ion o una sustancia con un electrón desapareado llamado radical libre. Un radical libre se forma usualmente por la descomposición de un material relativamente inestable llamado iniciador. El radical libre es capaz de reaccionar para abrir el doble enlace de un monómero de vinilo y adicionarse a él, quedando un electrón desapareado. En un tiempo muy breve (comúnmente en algunos segundos o menos) mucho más monómeros se suman sucesivamente a la cadena que crece. Finalmente, dos radicales libres reaccionan aniquilando recíprocamente su actividad de crecimiento formando una o más moléculas de polímero.

Con algunas excepciones, los polímeros formados por reacciones en cadena tienen solamente átomos de carbono en la cadena principal (polímeros de homocadena), mientras que los polímeros obtenidos por reacciones escalonadas pueden tener otros átomos, cuyo origen está en los grupos funcionales del monómero, como parte de la cadena (polímeros de heterocadena).

La resistencia química de los polímeros también está fuertemente influenciada por el grado de cristalinidad. En los polímeros cristalinos, los disolventes pueden atacar ligeramente la superficie del polímero, que tiene una menor cristalinidad. Cuando se aplica un esfuerzo, las grietas producidas no se propagan una vez que

llegan a las zonas cristalinas. Los polímeros amorfos presentan una mayor solubilidad por los cristalinos. Los disolventes atacan al polímero y forman pequeñas grietas que se extienden cuando se aplica un esfuerzo por pequeño que sea.

2.2. Copolímeros en bloques

De acuerdo con la IUPAC, los Co-polímeros en bloques son sustancias formadas por macromoléculas constituidas por bloques dispuestos en una secuencia lineal. Para este organismo, un bloque es una porción de una macromolécula, que comprende varias unidades constitutivas, que tienen al menos una característica que no está presente en las proporciones adyacentes¹².

Existen copolímeros formados por dos o por tres bloques, a los que se suele simbolizar, respectivamente, como AB y ABA o BAB donde A y B son los bloques poliméricos. También son posibles copolímeros en bloques constituidos por la repetición de unidades formadas por dos bloques AB, y por la incorporación a un polímero de dos bloques de una tercera cadena ABC.

El primer anuncio de la síntesis de un Co-polímero en bloques data de 1956 y se debe a Michael Szwarc. Este investigador observó que en la polimerización aniónica de estireno, las cadenas poliméricas crecían hasta que el monómero conducía a la formación de Co-polímeros en bloques. Szwarc introdujo el término “polímeros vivientes” para referirse a los polímeros que se obtenían por métodos en los cuales no estaba presente la etapa de terminación, que determina el fin de la polimerización.

En el caso de la modificación de asfaltos los polímeros más ampliamente utilizados son copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS) ya que los polímeros con esta morfología permiten formar una red o malla tridimensional en el interior del asfalto para darle a este, mejores propiedades mecánicas.

¹² (Jr., 2005)

2.3. Co-polímeros SBS.

El estireno-butadieno-estireno, frecuentemente abreviado SBS (del inglés Styrene-Butadiene-Styrene) es un elastómero termoplástico sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. Es un caucho duro, que se usa para hacer objetos tales como suelas para zapatos, cubiertas de neumáticos, y otros donde la durabilidad sea un factor importante. Es un tipo de Co-polímero llamado Co-polímero en bloque.

Estructura química.

Como se dijo anteriormente el SBS es un Co-polímero en bloque. Su cadena principal está constituida por tres segmentos. El primero es una larga cadena de poliestireno, el del medio es una cadena de polibutadieno, y el último es otra larga sección de poliestireno.



Ilustración 3. Cadena del copolímero SBS¹³

El poliestireno es un plástico duro y resistente y le da al SBS su durabilidad. El polibutadieno es un material parecido al caucho y le confiere al SBS sus características similares al caucho. Además, las cadenas de poliestireno tienden a agruparse formando grandes masas. Cuando un grupo estireno de una molécula de SBS se une a una de estas masas y la otra cadena de poliestireno de la misma

¹³ (E., 2000)

molécula de SBS se une a otra masa, las diversas masas se ensamblan entre sí con las cadenas similares al caucho del polibutadieno. Esto le da al material, la capacidad de conservar su forma después de ser estirado. El SBS se obtiene por medio de una polimerización aniónica viviente.

Una polimerización viviente es una que tiene lugar sin reacciones de terminación, es decir, que una vez que el monómero en el reactor ha sido agotado y se ha transformado en polímero, las cadenas poliméricas aún se encuentran activas. Si se colocara más monómero dentro del reactor, se adicionaría al polímero, haciéndolo más grande.

Propiedades

El SBS pertenecen a la clase de elastómeros termoplásticos que poseen las propiedades mecánicas del caucho a temperatura ambiente y las capacidades de procesamiento de termoplásticos. La mayor parte de los cauchos son difíciles de procesar, porque están entrecruzados. El SBS y otros elastómeros termoplásticos son similares al caucho sin ser entrecruzados, por lo que resulta sencillo procesarlos para lograr formas útiles debido a su punto de fusión 160-200°C (320-400°F).

El SBS ofrece un excelente coeficiente de fricción superficial, poca deformación permanente, una gran resistencia a la tracción, excelente comportamiento a bajas temperaturas y buenas propiedades eléctricas.

Usos

El SBS es muy adecuado para ser utilizado como material de sellado y un adhesivo en el proceso de fusión en caliente. También se utiliza ampliamente en aplicaciones como la fabricación de calzado, modificación de asfalto y lámina asfáltica, modificación de polímeros, materiales líquidos de sellado, capas o recubrimientos impermeables, cables eléctricos, componentes de automóviles, aparatos médicos, artículos de oficina y adhesivos.

2.4. Asfalto modificado

La Norma *N-CMT-4-05-002/01* define el asfalto modificado como el producto de la disolución, o incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido de neumático, que son sustancias estables en el tiempo y en los cambios de temperatura y que se añaden al material asfáltico para modificar sus propiedades físicas y reológicas, a fin de disminuir su susceptibilidad a la temperatura y a la humedad, así como a la oxidación¹⁴.

El modificar un asfalto no es nada nuevo, ya que es común hacerlo dado que de los cementos asfálticos se obtuvieron asfaltos rebajados, así como emulsiones asfálticas como las de rompimiento rápido, medio y lento en catiónicas y aniónicas o de un residuo fabricar un asfalto más duro o blando mediante la adición de aceites u otros productos.

La modificación de asfaltos empezó a utilizarse cuando se pensó que podían llegar a tener otras propiedades que mejorarían las características del mismo, dado que los asfaltos originales tenían problemas con el envejecimiento y oxidación, la capacidad para soportar altas o bajas temperaturas; el alto índice de tránsito, así como las cargas transmitidas al pavimento, que se pueden describir de la siguiente manera:

- a) Deformación permanente; que refleja por la aparición de roderas, debido a que el asfalto no es capaz de soportar las cargas, debido a las altas temperaturas del pavimento.
- b) Fatiga; éste se debe primordialmente al número de repeticiones de las cargas y a la intensidad de éstas y normalmente se refleja en la aparición de grietas en formación de tipo piel de cocodrilo.
- c) Grieta por baja temperatura que se ocasiona cuando el asfalto pasa a la etapa rígida y no es capaz de soportar movimientos ocasionados por las capas inferiores del pavimento “Fragilidad” y se traduce en grietas gruesas en forma de cuadrícula.

¹⁴ (transportes, 2012)

- d) Envejecimiento y oxidación; el asfalto es susceptible de ser atacado por los agentes atmosféricos sobre todo en la película delgada que envuelve el material pétreo, debido al ataque del oxígeno, provocando el envejecimiento que se traduce en rigidez, desgranamiento, o la aparición de calaveras o baches cuando ya es más intenso.

Estos fenómenos pueden ser contrarrestados de la siguiente manera:

- a) Deformación permanente; en ocasiones es factible reducir el fenómeno de roderas por alta temperatura, utilizando un asfalto de alta viscosidad, que sea capaz de soportar la temperatura del pavimento siempre y cuando a este asfalto se le verifique que no requiera que trabaje a bajas temperaturas que no las soporte el de más alta viscosidad, en caso contrario será necesario modificar el asfalto con un polímero de tipo SBS o un asfalto natural
- b) Fatiga; esto se puede deber a falta de espesor de la carpeta o de las capas inferiores del pavimento o de una mala distribución de los módulos dinámicos en las capas del pavimento o también que la mezcla asfáltica no sea capaz de absorber los esfuerzos que le transmiten dichas capas y en este caso deberá modificarse el asfalto para tener una mejor versatilidad con un polímero de tipo EVA, SBS o SBR, así como un modificador catalítico, pero debe revisarse con cuidado su aplicación, dado que se puede tener efectos contraproducentes.
- c) Grieta por baja temperatura; cuando se tengan problemas de altas temperaturas en verano y bajas temperaturas en invierno es recomendable el uso de polímeros de tipo EVA, SBS o SBR dado que estos son susceptibles de incrementar el gradiente térmico de los asfaltos de 20°C a 40°C dependiendo del modificador utilizado.
- d) El fenómeno del envejecimiento por oxidación debido a la lluvia, frío, calor, aire, etc., se debe a la presencia de película delgada en el pétreo y que los asfaltos pierden cierto tipo de aceites que dan cambios en la composición

del asfalto, lo que redundaría en mayor rigidez por envejecimiento, los polímeros del tipo SBS al formar cadenas que dan una mayor película de asfalto y retardan el envejecimiento incrementando su vida útil de 40 a un 80%.

- e) Reflejo de grietas de las capas inferiores; en ocasiones se tiene que colocar una sobre capa de pavimento sobre una carpeta antigua agrietada o en una reconstrucción, se tratan capas superficiales y las capas inferiores presentan grietas que después trataran de aflorar a la superficie, los tratamientos superficiales a base de carpetas delgadas de graduación media o abierta con asfalto modificado con hule molido de neumáticos de 15 a 20%, puede ser adecuados.

2.5. Principales modificadores del asfalto

Los modificadores del asfalto se pueden clasificar según la Norma *N-CMT-4-05-002/01*¹⁵, en tres grupos importantes:

Tabla 2. Modificadores de asfalto tipo I¹⁶

<h1>ASFALTO TIPO I</h1>		
<p>MEJORAS</p> <p>El comportamiento de mezclas asfálticas tanto en altas como en bajas temperaturas</p>	<p>FABRICADO</p> <p>Con base en bloques de estireno, en polímeros elastoméricos radiales del tipo bibloque o tribloque; mediante configuraciones como Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) o Estireno-Butadieno (SB).</p>	<p>UTILIZADO EN</p> <p>Mezclas asfálticas para carpetas delgadas y carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito y de vehículos pesados, en climas fríos y cálidos, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.</p>

¹⁵ (transportes, 2012)

¹⁶ (transportes, 2012)

Tabla 3. Modificadores de asfalto tipo II¹⁷

ASFALTO TIPO II		
<p>MEJORAS El comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas.</p>	<p>FABRICADO Con base en polímeros elastoméricos lineales, mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex.</p>	<p>UTILIZADO EN Todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.</p>

Tabla 4. Modificadores de asfalto tipo III

ASFALTO TIPO III		
<p>MEJORAS La resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas.</p>	<p>FABRICADO Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etil-Vinil-Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras.</p>	<p>UTILIZADO EN Climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.</p>

¹⁷ (transportes, 2012)

2.6. Estructura de los Asfaltos Modificados.

Los asfaltos modificados con polímeros están constituidos por dos fases, una formada por pequeñas partículas de polímero hinchado y otra por asfalto. En las composiciones de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero hinchado y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto parecen ser la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros.

El efecto principal de añadir polímeros a los asfaltos es el cambio en la relación viscosidad – temperatura (sobre todo en el rango de temperaturas de servicio de las mezclas asfálticas) permitiendo mejorar de esta manera el comportamiento del asfalto, tanto a bajas como a altas temperaturas.

Cuando se añaden polímeros al asfalto, las propiedades del asfalto modificado dependen de los siguientes parámetros¹⁸:

- I. Tipo de polímero a emplearse ya sean elastómeros o plastómeros.
- II. Su forma física.
- III. Naturaleza y grado de asfalto.
- IV. Tipo de equipo.
- V. Tiempo y temperatura durante el mezclado.
- VI. La compatibilidad Asfalto - Polímero.

¹⁸ (Carpio, 2002)

2.7. Compatibilidad de los Polímeros.

Para que los asfaltos modificados con polímeros consigan las prestaciones óptimas, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base (es necesario que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico), el tipo de polímero, la dosificación, la elaboración y las condiciones de almacenaje.

Cada polímero tiene un tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, donde por encima de ésta, el polímero sólo actúa como un filler (mineral como: cemento, cal, talco, sílice, etc.); y por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados y aumentan la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

Si un polímero se añade a dos diferentes asfaltos, las propiedades físicas de los productos finales, pueden ser muy diferentes. Para mayor efectividad, el polímero debe crear una red continua de trabajo en el asfalto; para que esto ocurra, la química del polímero y del asfalto necesita ser compatible.

Los polímeros compatibles producen rápidamente un asfalto estable, usando técnicas convencionales de preparación. Estos sistemas convencionales de preparación de asfaltos modificados con polímeros son grandes recipientes de mezclado con paletas agitadoras a velocidades lentas, o recipientes especiales que favorecen la recirculación con agitadores mecánicos de corte de gran velocidad. El polímero puede venir en polvo, en forma de pequeñas bolitas o en grandes panes. La temperatura de mezclado depende del tipo de polímero utilizado.

2.8. Cambio de Propiedades en el ligante Asfáltico.

El objetivo perseguido con las adiciones de polímero en el asfalto, es cambiar las propiedades físicas y reológicas del ligante, buscando:

- I. Aumentar la viscosidad, dependiendo de la cantidad y tipo de polímero.
- II. Disminuye la penetración.
- III. Aumenta el punto de reblandecimiento del asfalto entre 8 y 12 grados.
- IV. Aumenta el punto de inflamación.
- V. Disminuye la susceptibilidad a las variaciones de temperatura.
- VI. Sube entre uno y dos grados la clasificación PG (Penetración Grade ó Grado de Penetración) del asfalto.
- VII. Eleva la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%.
- VIII. Eleva la resiliencia por encima de 25.
- IX. Amplio rango de temperatura en el manejo y almacenamiento.
- X. Mayor intervalo de plasticidad.
- XI. Mayor cohesión.
- XII. Mayor resistencia a la acción del agua.
- XIII. Mayor resistencia al envejecimiento.

Las propiedades que estos imparten dependen de los siguientes factores:

- I. Tipo y composición del polímero incorporado.
- II. Características y estructura coloidal del asfalto base.
- III. Proporción relativa del asfalto base.

CAPITULO 3 TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

En este capítulo se explicará con base a la teoría del por qué el PET puede ser utilizado como un modificador de asfaltos y obtener resultados satisfactorios al llevarlo a la práctica experimental.

3.1 ¿Qué es el PET?

El PET es un poliéster lineal. Es extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas. Proporciona una gran resistencia a la degradación por impacto y resistencia a la tensión.

El PET es un plástico de alta calidad que se identifica con el número uno, o las siglas PET, rodeado por tres flechas en el fondo de los envases fabricados con este material, según el sistema de identificación de la SPI (Sociedad de Industrias del Plástico)¹⁹.



Ilustración 4. Símbolo de reciclaje del PET

El PET es producto de la condensación resultante de la esterificación de ácidos dicarboxílicos saturados con alcoholes di-funcionales. Las macromoléculas formadas son lineales, no reticuladas y en consecuencia tiene las propiedades características de los termoplásticos.

El PET está constituido de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET ésta compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% aire. A partir del petróleo crudo, se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar Ácido Tereftálico. El Etileno, que se obtiene a partir de derivados

¹⁹ (Marias, 2007)

del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se produce combinando al Ácido Tereftálico y el Etilenglicol²⁰.

Los poliésteres son muy estables a la luz, a los ácidos y a los disolventes no polares. Algunos de los disolventes orgánicos disuelven el PET a temperaturas elevadas.

3.2. Estructura química del PET

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático.

Poliéster

Los poliésteres son polímeros que contienen eslabones éster $-CO-O$ en su estructura molecular; éstos pueden ser termoplásticos o termoestables dependiendo de su composición química.

Un termoplástico es un material que a temperatura ambiente es deformable, pero que en presencia de calor se ablanda convirtiéndose en un líquido maleable que se endurece en un estado vítreo cuando se enfría suficiente, pudiéndose moldear con nuevas formas que se conservan al enfriarse. Presenta este comportamiento debido a que sus macromoléculas están unidas por fuerzas débiles que se rompen con el calor.

Los plásticos termoestables son materiales que una vez que han sufrido el proceso de calentamiento- fusión y formación- solidificación, se convierten en materiales rígidos que no vuelven a fundirse. La disposición microscópica de sus cadenas confiere a la estructura una organización espacial similar a la de una red, por lo que la estructura macroscópica resultante es muy compacta y de gran rigidez. Estos materiales presentan respecto al resto de los plásticos una mayor resistencia térmica por lo que al aportar más calor no logra romperse la estructura de cadenas. No obstante, su fragilidad es inversamente proporcional a la resistencia térmica. Efectivamente, la resistencia térmica viene dada por la mayor compactación de las cadenas, pero ese mismo mayor empaquetamiento da lugar a una posibilidad de rotura mayor debido a que las

²⁰ (Marias, 2007)

cadena difícilmente pueden absorber un impacto por estiramiento ya que su libertad de movimiento no es muy alta.

Termoplásticos

Consisten en macromoléculas lineales o ramificadas, unidas unas con otras mediante fuerzas intermoleculares. Los termoplásticos se caracterizan por transformarse de sólido a líquido y viceversa por acción del calor, se disuelven o por lo menos se hinchan al contacto con solventes. La capacidad de los termoplásticos de reblandecerse o fundirse tiene sus ventajas y desventajas. Por ejemplo, pueden moldearse por calor, es decir, una lámina o un tubo puede pasar a un estado elástico, similar al de la goma blanda, y adquirir nueva forma después de enfriarla en un molde. Además, los termoplásticos pueden soldarse y sus desechos son reciclables.

Las desventajas consisten en que el reblandecimiento provocado por el calor limita en gran manera sus temperaturas de uso, sobre todo cuando se someten a la acción simultánea de fuerzas mecánicas.

Poliéster termoplástico

El PET está dentro de la familia del poliéster termoplástico.

Estos grupos pueden destruirse con la presencia de moléculas de agua a elevadas temperaturas, generando una reacción de hidrólisis, por lo que estos plásticos deben procesarse en un estricto estado seco. A temperatura ambiental no se ven afectados por la humedad y, en particular, la baja absorción de agua contribuye a su buena estabilidad dimensional.

El PET es una resina poliéster de glicol etilénico y ácido tereftálico. Dicho plástico se clasifica en función de la viscosidad intrínseca, la cual es directamente proporcional a su peso molecular, y de la modificación polimérica que reduce la velocidad de cristalización y el punto de fusión.

Se clasifica como una resina sintética termoplástica o un polímero termoplástico semicristalino.

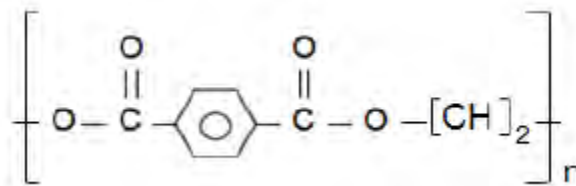


Ilustración 5. Fórmula estructural del PET²¹

Clasificación

En la industria se conoce mejor este tipo de material por su grado y aplicación que está en función de la cristalinidad, del peso molecular y en consecuencia de la viscosidad intrínseca. El PET por su baja velocidad de cristalización y en función de las condiciones de operación en la transformación, se puede encontrar en estado amorfo (A-PET) o semicristalino (C-PET) con un 30 a 40% de cristalinidad, lo que quiere decir que el PET es un plástico cristalizabile²².

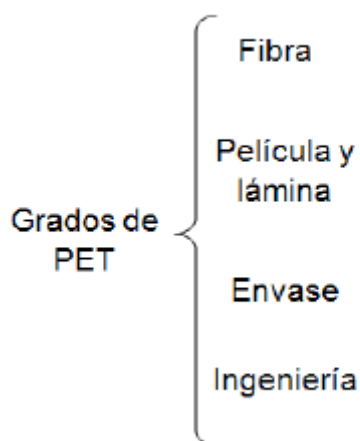


Ilustración 6. Grados de PET²³

Los que presentan menor peso molecular se denominan grado fibra, los de peso molecular medio, grado película y, aquellos de mayor peso molecular, grado ingeniería. El peso molecular del PET grado envase se encuentra intermedio entre el grado película y el grado ingeniería. A mayor peso molecular, mejores propiedades mecánicas. En cuanto a la cristalinidad, los

²¹ (E., 2000)

²² (Carpio, 2002)

²³ (Carpio, 2002)

que la poseen en mayor nivel son para el grado ingeniería; para lámina y botella se utiliza el grado amorfo.

Estructura química

La resina PET es un poliéster termoplástico compuesto por cadenas de tereftalato de polietileno.

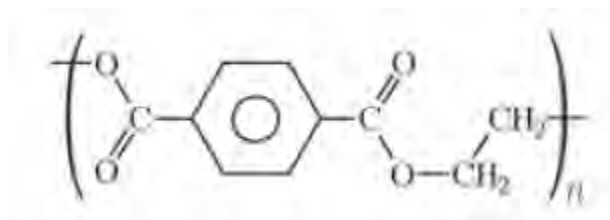


Ilustración 7. Formula estructural del PET²⁴

Se fabrica a partir de dos materias primas derivadas del petróleo: el etileno (CH₂ = CH₂) y el paraxileno.



Ilustración 8. Formulas estructurales de las moléculas de Etileno y Paraxileno²⁵

Ambos productos se ponen a reaccionar a altas temperaturas y bajo condiciones especiales de presión para obtener la resina PET en estado sólido y amorfo. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol. El PET se obtiene mediante la condensación del etilenglicol y el ácido tereftálico, el cual asume el papel primario en las fibras y materiales de moldeo.

²⁴ (E., 2000)

²⁵ (E., 2000)

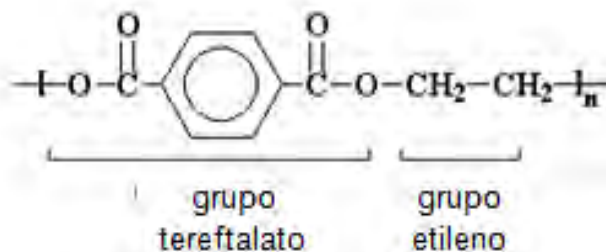


Ilustración 9. Fórmula estructural de la molécula de Tereftalato y Etileno²⁶

Ácido Tereftálico.

Propiedades.

Se presenta en forma de cristales o polvo blanco; es insoluble en agua, cloroformo, éter y ácido acético. Ligeramente soluble en alcohol y soluble en álcalis, es poco combustible y tóxico. Sublima a temperaturas entre 300 y 425 °C.

Estructura.

También llamado ácido paraftálico o ácido benceno-p-dicarboxílico, es del tipo aromático donde los radicales carboxilos se encuentran en posición *para*, en lados opuestos:

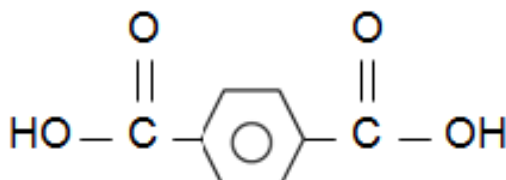


Ilustración 10. Fórmula estructural de la molécula del Ácido Tereftálico

Etilenglicol

Propiedades

Es un líquido transparente, incoloro, de sabor dulce, higroscópico y poco volátil. Es soluble en agua, alcohol y éter. Baja el punto de congelación del agua, usándose como base en los anticongelantes.

²⁶ (E., 2000)

Estructura

Conocido también con el nombre de alcohol etilénico, glicol ó 1, 2-etanodiol. Es el glicol más simple, tiene dos radicales oxidrilos, uno en cada átomo de carbono como se puede observar en su estructura:

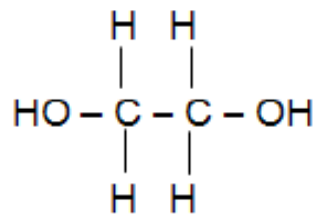


Ilustración 11. Fórmula estructural de la molécula de Etilenglicol²⁷

3.3. Propiedades físicas del PET

Las propiedades físicas del PET y su capacidad para cumplir diversas especificaciones técnicas han sido las razones por las que el material ha alcanzado un desarrollo relevante en la producción de una gran diversidad de envases, especialmente en la producción de botellas para refresco y agua.

Entre las características más importantes que presenta se encuentran:

- I. Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes
- II. Alta resistencia al desgaste y corrosión
- III. Buen coeficiente de deslizamiento
- IV. Buenas propiedades térmicas
- V. Totalmente reciclable
- VI. Ligero
- VII. Resistencia y rigidez elevadas
- VIII. Buena resistencia a la fluencia
- IX. Elevada dureza de la superficie
- X. Gran estabilidad dimensional

²⁷ (C., 2006)

3.4. Propiedades Químicas

Debido a sus propiedades químicas el PET representa un material con propiedades de resistencia muy buenas para alcoholes y aceites esenciales, además de una alta resistencia a diversos agentes químicos. Tiene buena resistencia general, en especial a grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. En contra parte, presenta poca resistencia a solventes halogenados, aromáticos, cetonas de bajo peso molecular y bases²⁸.

Tabla 5. Propiedades del PET²⁹

TERMINO	VALOR	UNIDAD
Punto de fusión	250-260	°C
Punto de ablandamiento	170	°C
Calor específico	1.04-1.05	kJ/(kg*K)
Coefficiente de expansión lineal	$< 6 \times 10^{-5}$	°C-1
Temperatura de Transición Vítrea	70	E-6/K
Temperatura de Servicio	-40- 100	°C

²⁸ (Marias, 2007)

²⁹ (Marias, 2007)

3.5. Resistencia Química del PET

El PET es resistente a multitud de agentes químicos agresivos los cuales no son soportados por otros materiales. A continuación, se muestra su resistencia a diversos químicos³⁰.

Tabla 6. Resistencia química del PET en alcoholes³¹.

ALCOHOLES	
Metanol	Muy resistente
Etanol	Muy resistente
Isopropanol	Resistente
Ciclohexanol	Muy resistente
Glicol	Muy resistente
Glicerina	Muy resistente

Tabla 7. Resistencia química del PET en aldehídos³².

ALDEHIDOS	
Acetaldehido	Muy resistente
Formaldehido	Muy resistente

Tabla 8. Resistencia química del PET en hidrocarburos³³.

HIDROCARBUROS	
Benceno	Resistente
Tolueno	Resistente
Xileno	Resistente
Hidrocarburo alifático	Resistente
Gasolina	Resistente
Aceite mineral	Resistente

³⁰ (Billmeyer, 2004)

³¹ (Carpio, 2002)

³² (Carpio, 2002)

³³ (Carpio, 2002)

Tabla 9. Resistencia química del PET en hidrocarburos clorados³⁴.

HIDROCARBUROS CLORADOS	
Tetracloruro de carbono	Muy resistente
Cloroformo	Resistente
Difenil clorado	Muy resistente
Tricloro etileno	Muy resistente

Tabla 10. Resistencia química del PET en ácidos³⁵.

ACIDOS	
Ácido Formica	Muy resistente
Ácido Acético	Muy resistente
Ácido Clorhídrico 10 y 30%	Resistente
Ácido Fluorhídrico 10 y 35%	Muy resistente
Ácido Nítrico 10%	Muy resistente
Ácido Nítrico 65 y 100%	No resistente
Ácido Fosfórico 30 y 85%	Muy resistente
Ácido Sulfúrico 20%	Resistente
Ácido Sulfúrico 80% o mas	No resistente
Anhídrido Sulfuroso seco	Muy resistente
Dióxido de Azufre gaseoso seco	No resistente

Tabla 11. Resistencia química del PET en disolventes³⁶.

DISOLVENTES	
Éter	Muy resistente
Acetona	No resistente
Nitrobenceno	No resistente
Fenol	No resistente

³⁴ (Carpio, 2002)

³⁵ (Carpio, 2002)

³⁶ (Carpio, 2002)

Tabla 12. Resistencia química del PET en soluciones alcalinas acuosas³⁷.

SOLUCIONES ALCALINAS ACUOSAS	
Hidróxido Amónico	No resistente
Hidróxido Cálcico	Resistente
Hidróxido Sódico	No resistente

Tabla 13. Resistencia química del PET en soluciones salinas³⁸.

SOLUCIONES SALINAS	
Dicromato	Muy resistente
Carbonatos alcalinos	Muy resistente
Cianuros	Muy resistente
Fluoruros	Muy resistente
Bicarbonato	Resistente

Tabla 14. Resistencia química del PET en otras sustancias³⁹.

OTRAS SUSTANCIAS	
Cloro	Muy resistente
Agua	Muy resistente
Peróxido de Hidrogeno	Muy resistente
Oxígeno	Muy resistente

TABLA 15. Resistencia química del PET en esteres⁴⁰.

ESTERES	
Acetato Etilico	Resistente

³⁷ (Carpio, 2002)

³⁸ (Carpio, 2002)

³⁹ (Carpio, 2002)

⁴⁰ (Carpio, 2002)

3.6. Propiedades Biológicas del PET.

El PET es un material resistente a la degradación por microorganismos (biodegradación) ya que éstos no tienen mecanismos para atacarlo. Debido a esta característica no representa un medio adecuado para la proliferación de hongos, parásitos o bacterias de putrefacción. Es resistente al ataque de polillas, roedores e insectos. Al no ser un elemento biodegradable, mantiene su inalterabilidad en el tiempo, lo que le proporciona una larga vida útil. Aunado a esto, el PET es inodoro, reciclable y no contiene componentes tóxicos como otros plásticos.

Estudios recientes llevados a cabo en diferentes países señalan que, dentro de poco tiempo, será realidad una nueva forma de degradación de los envases de PET por una vía microbiológica. En el Instituto Tecnológico de Kyoto el investigador Kohei Oda consiguió que envases PET fuesen degradados en tan sólo ocho semanas por un consorcio de bacterias y, en la mitad de ese tiempo, por una bacteria específica aislada de ese consorcio. Las bacterias identificadas por él metabolizan poliésteres como el PET (2007). En México, científicos de la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología (UPIBI) del Instituto Politécnico Nacional, liderados por el Dr. Claudio Garibay Orijel, lograron mediante pruebas in vitro que consorcios formados por hongos y bacterias degradaran a uno de los principales compuestos del PET: el ácido teraftálico (2009)⁴¹.

3.7. Reciclaje de PET en México.

México es el segundo país que más consume PET. Sin embargo, aún tiene retos importantes en cuanto a manejo de residuos sólidos y, además, posee uno de los vertederos a cielo abierto más extensos. Ante este escenario, resulta sumamente valioso que el país sea líder en el acopio y reciclaje de PET posconsumo, así como que tenga la planta de reciclado de PET grado alimenticio más grande del mundo.

⁴¹ (Flores, 2013)

Todo inició cuando el Gobierno Federal y del Distrito Federal solicitó a la industria trabajar conjuntamente en el establecimiento de una solución que contribuyera a la recuperación de residuos de envases de PET post-consumo. En respuesta, la industria de bebidas y alimentos se agremió en una asociación civil a la que llamaron ECOCE (Ecología y Compromiso Empresarial), que comenzó a operar en 2002, con el propósito fundamental de recuperar y valorizar los residuos de envases de PET para evitar que se entierren en vertederos.

Hoy en día, ECOCE es un actor clave en la industria, y ha extendido el alcance de su labor hasta en la construcción de políticas públicas medioambientales, así como hacia la generación de campañas de comunicación para crear conciencia en la sociedad civil y promover la cultura del reciclaje, que inicia desde la adecuada separación de residuos. ECOCE está formada por 24 grupos industriales, productores de refrescos, aguas, bebidas deportivas, jugos, salsas, condimentos y alimentos.

Según datos de ECOCE, el acopio de PET en México ha sido el más alto de América en los últimos tres años. En 2014, el consumo aparente nacional de PET virgen para envases rodeó las 700,000 toneladas, de las cuales se recuperaron 57.8%. De lo acopiado en el país, 46.2% se valorizó y se comercializó en México, mientras que 56.8% fue a exportación, principalmente a China y a Estados Unidos. Así mismo, se destaca, que México es líder mundial en reciclado botella a botella grado alimenticio, con 57%, seguido por Estados Unidos con 22% y por la Unión Europea, con 22%, según información de Napcor, PCI y ECOCE.

Según la ECOCE el 54 por ciento del material reciclado se transforma en fibras de poliéster, el 14 por ciento para envases de alimentos, el 13.20 por ciento para correas y el 7.2 por ciento en contenedores.

Mientras que un 6.6 por ciento del producto reciclado va para la producción de hojas y films; para el segmento de las resinas se destina el 1.4 por ciento y el 2.7 por ciento en otros productos.

Y cabe destacar que, por cada tonelada de PET recuperada, se ahorran 35 metros cúbicos en relleno sanitario, 4.4 barriles de petróleo, 357 dólares en materia prima que no será usada para hacer productos vírgenes y se dejan de emitir 3.3 toneladas de CO₂ a la atmósfera, según información de la ECOCE⁴².

3.8. Cómo se recicla el PET

Según la Secretaria de Medio Ambiente el PET se recicla de la siguiente manera:

Una vez recolectado, los envases de PET van a las estaciones de reciclado donde son molidos en forma de copos. Los copos son separados y limpiados de acuerdo con las especificaciones del mercado. El PET recuperado luego es vendido a los fabricantes quienes lo convierten en productos útiles.

El PET también puede ser depolimerizado a través de metanólisis o glicólisis. Dichos procesos someten al PET a una reacción química que lo reduce a sus monómeros o a sus materias primas originales.

El resultante luego es purificado o vuelto a reaccionar, dando un nuevo PET que puede usarse para envases de alimentos, etc.

En algunos lugares, el PET es usado para envases de alimentos a través de su transformación en la lámina central de una estructura multilaminada o por limpieza especial.

La incineración con recuperación energética representa el 17% de la disposición de los residuos sólidos en EE.UU. El PET tiene un alto valor de incineración de 10,000 BTU por libra, una cantidad que se compara al carbón. Como los envases de PET no contienen halógenos, azufre o nitrógeno, los productos de la combustión completa son compuestos que contienen hidrógeno, oxígeno y carbono.

En su forma básica, el PET está compuesto de carbono, hidrógeno, y oxígeno. El PET no contiene halógenos (cloro o bromo), sulfuro, o nitrógeno.

La mayoría de los envases de PET no requieren aditivos tales como estabilizadores, plastificantes o anti-oxidantes.

⁴² (Herrera E. , 2016)

Basado en la relación fortaleza/peso, el PET crea menos residuos sólidos por unidad de contenidos que el vidrio o el aluminio.

La producción, uso y disposición de los envases de PET implica menos energía, menos emisiones aéreas y menos residuos líquidos, comparado con otros materiales de packing.

Reciclado mecánico

El PET es reciclable, es decir, se vuelve a fundir y transformar en productos finales. El Polietileno reciclado es utilizado para fabricar bolsas de residuos, caños, madera plástica para postes, marcos, film para agricultura, etc.

Recuperación energética:

Los residuos plásticos contienen energía comparable con la de los combustibles fósiles, de ahí que constituyen una excelente alternativa para ser usados como combustible para producir energía eléctrica y calor.

Reciclado químico:

En la actualidad se están desarrollando nuevas técnicas de gran complejidad que permitirán reciclar químicamente no sólo al PET sino a todos los plásticos. De esta manera se podrán recuperar los componentes naturales para volverlos a utilizar como materias primas y así optimizar aún más los recursos naturales.

Rellenos Sanitarios:

El PET al igual que otros plásticos, es un material demasiado valioso como para desecharlo; por lo que su valorización es siempre la opción preferible para su tratamiento. Pero de no mediar otra opción, si tienen que ser enterrados en un Relleno Sanitario, es importante saber que los residuos de polietileno son absolutamente inocuos para el medio ambiente. Por su naturaleza son inertes y no sufren degradación lo cual nos garantiza que no generan lixiviados de productos de degradación, líquidos o gases que puedan emitirse al suelo, aire o aguas subterráneas.

Esto nos hace pensar que en un futuro parte de lo que se recicla de PET en México también pueda destinarse para la obtención de un cemento asfáltico más resistente.

3.9. Solución teórica del problema planteado con base al conocimiento científico teórico acumulado.

Una vez recopilada la información teórica, se tratará de dar una solución al problema planteado con la información presentada.

Está comprobado que el asfalto convencional posee propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de resistencia a distintas condiciones climáticas y de tránsito, pero en la actualidad los grandes volúmenes de tránsito sobre los criterios de diseño vehicular y el exceso de carga, así como las condiciones climáticas a las que están sometidos, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de carreteras actualmente no satisfagan sus expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, la poca durabilidad de un camino reflejándose en grietas o cuarteaduras en la carpeta asfáltica. Además de los factores directos que intervienen en la optimización del asfalto coexisten algunos otros que son indirectos causados por un mal proceso de construcción, por un mantenimiento de baja calidad y por la necesidad de optimizar las inversiones, provoca que en algunos casos, las propiedades de los asfaltos convencionales resulten insuficientes.

Es por esto que es necesario modificar los asfaltos convencionales y no solo eso, sino que el proceso de modificación sea barato y de buena calidad, por lo que se optó por una modificación polimérica con tereftalato de polietileno, dadas sus propiedades como termoplástico y que es un polímero 100% reciclable, se espera que la susceptibilidad térmica del asfalto convencional aumenten con este tipo de polímero condensado, ya que el PET es utilizado ampliamente en la industria química, eso nos da una garantía de que es un polímero muy versátil, útil y de bajo costo.

CAPITULO 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO.

Técnicas de caracterización.

Las técnicas de caracterización de asfaltos nos permiten conocer y comparar las propiedades de una muestra sometida a una modificación polimérica contra el asfalto común y observar si existe alguna mejora en las propiedades termo mecánicas del mismo. Estos procedimientos están estandarizados bajo la norma ASTM D5 y ASTM D36 y se describen a continuación⁴³.

4.1. Prueba de Penetración.

Mediante la penetración se determina la dureza del asfalto a determinada temperatura. Se denomina penetración a la distancia en décimas de milímetro que una aguja penetra verticalmente durante 5 s, la cual soporta una pesa de (100 ± 0.05) g.

La prueba consiste en medir la penetración de una aguja de punta cónica estándar en función de la fuerza aplicada y del tiempo de aplicación.

Esta prueba por lo regular se trabaja a 25 °C y los resultados se expresan en décimas de milímetro. (31)

Este aparato en conjunto se denomina penetrómetro, el cual tiene un resorte que mueve una aguja para leer la distancia de penetración, los resultados se reportan en 1/10 mm.

⁴³ (Materials, Standard testmethod for penetration of Bituminous Materials, 1986)

4.1.1. Penetrómetro

Cualquier equipo que permita el movimiento vertical sin fricción apreciable del vástago sostenedor de la aguja, y que sea capaz de indicar la profundidad de la penetración con una precisión de 0,1 mm. El peso del vástago será de $47,5 \pm 0,05$ g. El peso total de la aguja y el vástago será de $50,0 \pm 0,05$ g. Para cargas totales de 100 g y 200 g, dependiendo de las condiciones en que se aplique el ensayo, se estipulan pesas de $50,0 \pm 0,05$ g y $100,0 \pm 0,05$ g.

La superficie sobre la que se apoya la cápsula que contiene la muestra será lisa y el eje del émbolo deberá estar aproximadamente a 90° de esta superficie. El vástago deberá ser fácilmente desmontable para comprobar su peso.

4.1.2. Aguja de penetración

La aguja (ver Ilustración 12) es de acero inoxidable templado y duro, grado 440-C o equivalente, HRC 54 a 60; debe tener aproximadamente 50 mm de largo y su diámetro entre 1,00 y 1,02 milímetros.

Será simétricamente afilada en forma cónica, con un ángulo entre $8,7^\circ$ y $9,7^\circ$ con respecto al largo total del cono, el que debe ser coaxial con el cuerpo recto de la aguja. La variación total axial de la intersección del cono y la superficie recta no debe exceder de 0,2 mm. La punta truncada del cono debe tener un diámetro entre 0,14 y 0,16 mm y en ángulo recto al eje de la aguja con una tolerancia de 2° .

El filo de la superficie de la punta truncada debe ser bien formado y libre de rugosidad. Cuando la textura de la superficie se mide de acuerdo con la **American National Standard B 46.1 o ISO468**, la aspereza superficial (Ra) del cono aguzado debe estar entre 0,2 y 0,3 μm como promedio aritmético.

La aspereza superficial (R_a) del eje de la aguja debe estar entre 0,025 y 0,125 micrones.

La aguja debe montarse en un casquete de metal no corrosivo, que tenga un diámetro de $3,2 \pm 0,05$ mm y una longitud de 38 ± 1 mm. La longitud expuesta de la aguja estándar debe estar comprendida entre 40 y 45 mm.

La aguja debe estar rígidamente montada en el casquete. La carrera (lectura del indicador de penetración total) de la punta de la aguja y cualquier porción de la aguja relativa al eje del casquete, no deberá exceder de 1 mm.

La masa del conjunto casquete - aguja será de $2,50 \pm 0,05$ g (se puede perforar con taladro o limar el casquete, para controlar el peso). Coloque marcas de identificación individual en el casquete de cada aguja; las mismas marcas no deberían repetirse por un mismo fabricante dentro de un período de tres años⁴⁴.

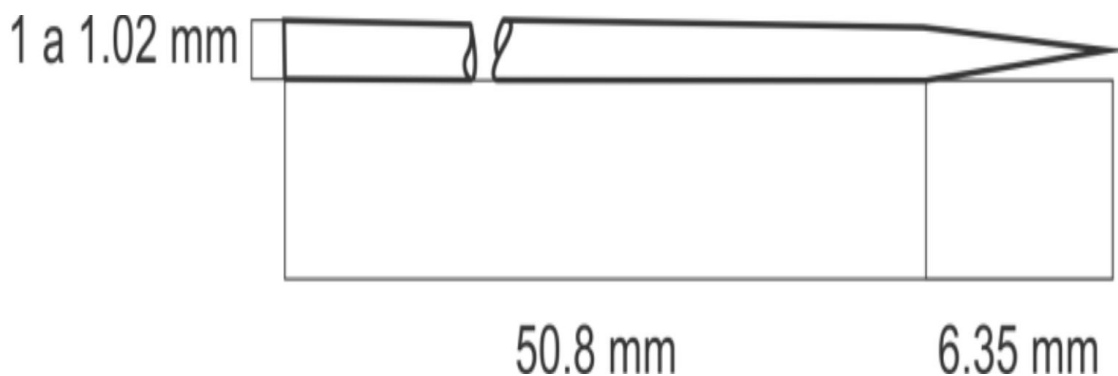


Ilustración 12. Aguja del Penetrómetro⁴⁵.

⁴⁴ (Materials, Standard testmethod for penetration of Bituminous Materials, 1986)

⁴⁵ (Materials, Standard testmethod for penetration of Bituminous Materials, 1986)



Ilustración 13. Esquema de la aguja penetrando el asfalto⁴⁶.

4.1.3. Precisión en los resultados.

Use el siguiente criterio para juzgar si los resultados de penetración son aceptables para asfaltos a 25°C.

Precisión para un solo operador

El coeficiente de variación determinado para un solo operador, es de 1,4% para penetraciones sobre 60 y la desviación estándar para un solo operador, desde 0,35 para penetraciones bajo 50.

Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente ejecutados por el mismo operador, con el mismo material de cualquier penetración y usando el mismo equipo, no deberían diferir uno del otro en más de 4% de su media o de una unidad.

Precisión entre laboratorios

El coeficiente de variación encontrado entre laboratorios es de 3,8% para penetraciones sobre 60 y la desviación estándar entre laboratorios es de 1,4 para penetraciones bajo 50. Por lo tanto, los resultados de dos ensayos adecuadamente ejecutados, con el mismo material de cualquier penetración y

⁴⁶ (Materials, Standard testmethod for penetration of Bituminous Materials, 1986)

en dos laboratorios diferentes, no deberían diferir uno del otro en más de 11% de su media o 4 unidades en otros casos.

4.2. Temperatura de ablandamiento.

Por ser mezclas complejas, los asfaltos no presentan un punto de fusión definido, sino que su consistencia se va haciendo más y más blanda a medida que aumenta la temperatura. Arbitrariamente, se ha definido el punto de ablandamiento como la temperatura a la cual el asfalto es suficientemente blando para que una esfera de acero (diámetro de 0,953 cm y masa de 3.5 g) pase a través de un anillo (Diámetro Interno de 1,588 cm y altura de 0,635 cm) y en la que dentro de ella se encuentra una muestra del asfalto a estudiar.

El sistema está colocado en un baño de agua o de glicerina, cuya temperatura se incrementa a razón de 5 °C por minuto. Cuando la esfera atraviesa el anillo, la temperatura del baño corresponde al punto de ablandamiento.

4.2.1. Soporte del Anillo

Los anillos deberán sujetarse en posición horizontal, con el fondo a 25 mm por encima de la superficie superior de la placa, y la superficie inferior de ésta a una distancia de por lo menos 13 mm y no mayor de 19 mm al fondo del vaso. La profundidad del líquido en el vaso deberá ser mayor que 100 mm (VER ILUSTRACION 15.).

El termómetro deberá suspenderse de manera que el fondo del bulbo esté a nivel con el fondo del anillo y dentro de 13 mm de distancia del anillo, pero de manera que no lo toque⁴⁷.

4.2.2. Precisión en los resultados.

El siguiente criterio se debe utilizar para juzgar la aceptabilidad de los resultados (95% de probabilidad).

⁴⁷ (Materials, TestStandard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus), 1986)

Repetitividad. La duplicidad del punto de ablandamiento obtenido por el mismo operador no se considerará dudosa a menos que difiera de ésta más de 1°C (desviación normal estimada 0,73%).

Reproducibilidad. Los puntos de ablandamiento informados por cada uno de dos laboratorios, no se considerarán dudosos a menos que los dos informes difieran en más de 2°C (desviación normal estimada 1,26%).

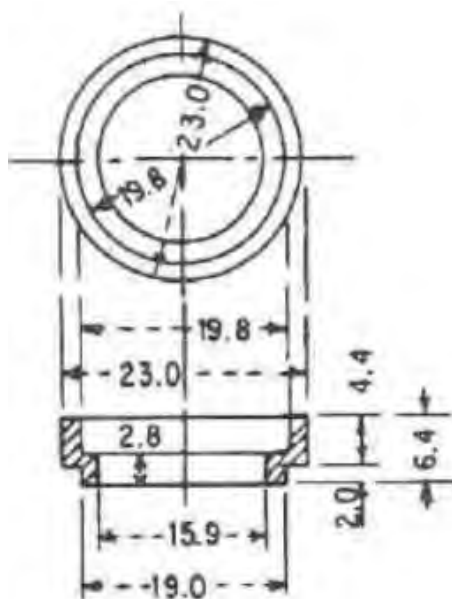


Ilustración 14. Dimensiones del anillo para la prueba de ablandamiento⁴⁸.

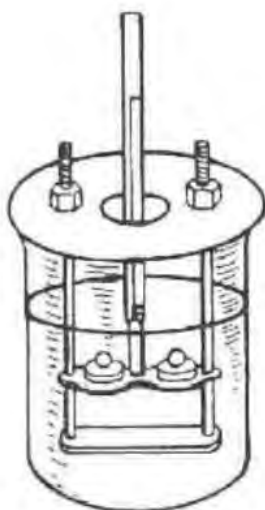


Ilustración 15. Arreglo para la prueba de ablandamiento⁴⁹.

⁴⁸ (Materials, TestStandard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus), 1986)

⁴⁹ (Materials, TestStandard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus), 1986)

Nota B: Este diámetro debe ser ligeramente más grande (aproximadamente 0,05 mm) que la dimensión "A" de fig. 1 Anillo-para deslizar sobre el anillo.

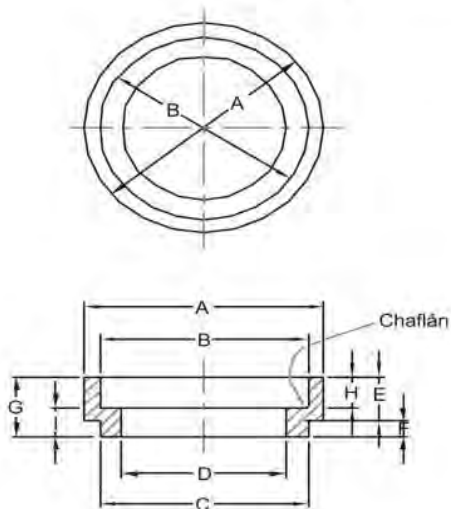


Fig. 1 anillos.

- A 23,1 mm ± 0,3 mm
- B 19,8 mm ± 0,3 mm
- C 19,1 mm ± 0,3 mm
- D 15,9 mm ± 0,3 mm
- E 4,4 mm ± 0,3 mm
- F 2,0 mm ± 0,3 mm
- G 6,4 mm ± 0,4 mm
- H 3,5 mm ± 0,3 mm
- I 2,8 mm ± 0,3 mm

Nota A: Este diámetro debe ser ligeramente más grande (aproximadamente 0,05 mm) que la dimensión "C" de la fig. 1 Anillos-para permitir la colocación del anillo. El ensamble final del bulbo del termómetro será a 12,7 mm de la bola.

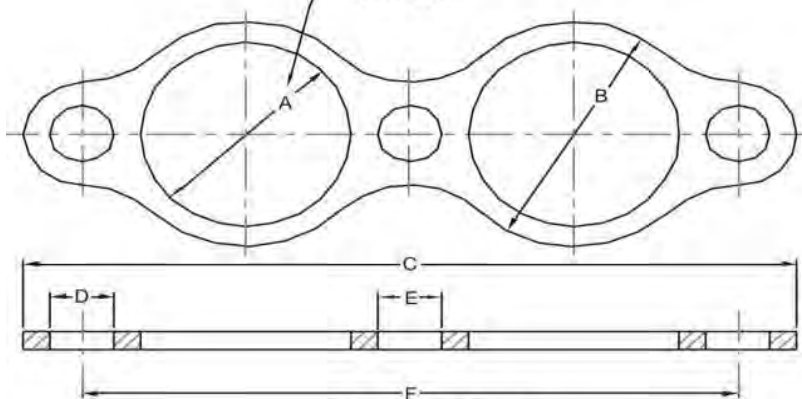
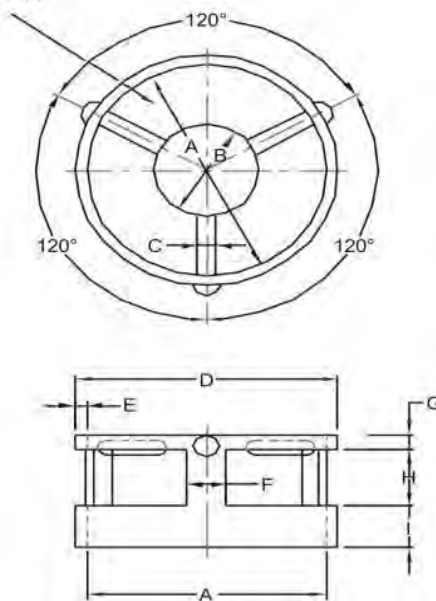


Fig. 2 Porta-anillos.

- A 19,1 mm ver Nota A
- B 23,9 mm ± 0,5 mm
- C 76,2 mm ± 0,5 mm
- D 5,6 mm ± 0,5 mm
- E 5,6 mm ± 0,5 mm
- F 66,5 mm ± 0,5 mm



Nota C: Esta dimensión debe ser ligeramente más grande (aprox. 0,05 mm) que 9,6 mm para permitir la colocación y centrado de la bola.

Fig. 3 guía para centrar la bola

- A 23,1 mm ver Nota B
- B 3,5 mm ver Nota C
- C 1,5 mm ± 0,6 mm
- D 24,6 mm ± 0,3 mm
- E 0,8 mm ± 0,5 mm
- F 3,0 mm ± 0,5 mm
- G 1,5 mm ± 0,3 mm
- H 4,8 mm ± 0,3 mm
- I 4,3 mm ± 0,3 mm

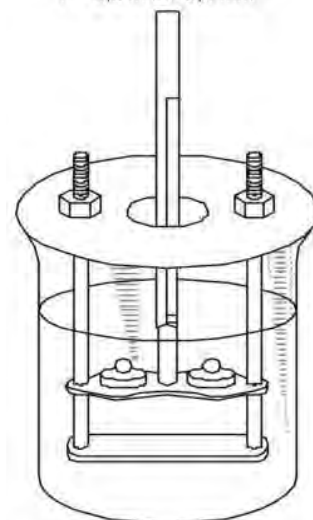


Fig. 4 Conjunto de dos anillos.

Ilustración 16. Arreglo y dimensiones para la prueba de ablandamiento⁵⁰.

⁵⁰ (Materials, TestStandard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus), 1986)

4.3. Índice de penetración.

El índice de penetración es un parámetro adimensional que proviene de una función linealizada que relaciona los resultados de las pruebas de temperatura de ablandamiento y penetración. Establece criterios para estimar la susceptibilidad térmica del material asfáltico.

En el año de 1936, Pfeiffer y Van Doormal observaron una relación lineal entre el logaritmo de la penetración y la temperatura a la que se realiza el ensayo, en donde la pendiente de la recta puede interpretarse como la susceptibilidad térmica del material.

De esta manera, extrapolaron los valores experimentales de penetración y dedujeron que los asfaltos tenían un valor de penetración de 800 (1/10mm) cuando alcanzan una temperatura a la cual presentan un comportamiento líquido muy viscoso (temperatura de ablandamiento).

Posteriormente graficaron los valores de penetración en escala semilogarítmica versus distintas temperaturas de ensayo, definiendo la pendiente de esta curva como la susceptibilidad térmica (B), representada matemáticamente como:

$$1. \quad B = \log \frac{800}{\frac{PEN_{25}}{TA}}$$

En donde:

PEN₂₅ es el valor de la prueba de penetración a temperatura estándar (25 °C)

TA es la temperatura de ablandamiento.

De esta manera se define el índice de penetración como:

$$2. \quad IP = \frac{20 - (500 * B)}{(1 + (50 * B))}$$

De acuerdo al INDICE DE PENETRACION (IP), los asfaltos pueden ser clasificados en tres grupos⁵¹.

Tabla 16. Características del asfalto de acuerdo al IP.

Valores de IP	Características del asfalto de acuerdo al valor de IP
+1 < IP	Son mezclas de poca susceptibilidad a la temperatura presentando cierta elasticidad, presentan comportamiento de fluido no newtoniano.
-1 > IP	Mezclas asfálticas con mayor susceptibilidad a la temperatura; ricas en resinas y con su comportamiento algo viscoso, que corresponde a un fluido newtoniano.
-1 < IP < +1	Características intermedias entre las dos anteriores; pertenecen a este grupo la mayoría de las mezclas asfálticas que se utilizan en la construcción de carreteras.

⁵¹ (Materials, Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements, 1991)

CAPITULO 5 MATERIALES Y RECURSOS EXPERIMENTALES.

5.1. Preparación del Tereftalato de Polietileno (PET) para su utilización en la modificación de asfalto.

Objetivo:

Obtener el Tereftalato de polietileno (PET) en forma de polvo para un mejor mezclado.

Equipo y material utilizado:

- Varias botellas de PET
- Unas tijeras lo suficientemente filosas para cortar el PET.
- Una lija de agua del número 220.
- Un recipiente de plástico con cierre hermético.
- Limpia pipas y jabón.
- Cubre bocas

Procedimiento:

1. Cualquier botella de PET es ideal para su utilización en la modificación solo con la restricción de que tiene que ser transparente y de refresco las cuales pueden obtenerse prácticamente en cualquier parte.
2. La botella de PET a utilizar se le tiene que quitar la etiqueta y lavar perfectamente con la ayuda de un limpiapipas y jabón, así como una agitación vigorosa de arriba hacia abajo, enjuagar varias veces y secar bajo la sombra.
3. Una vez seca la botella, con las tijeras cortar la parte superior donde se encuentra la boca de la botella, cuando la parte superior de la botella ya no sea parte de la misma hacer un corte por la mitad de la botella y cortar la parte inferior haciendo un corte de 360°, por lo tanto, la botella

quedará como un cilindro y por el corte en medio quedará como una Lámina al extenderse la cual se cortará en dos partes.

4. Tomar una de las dos partes de botella y con la ayuda de un pedazo de lija de agua del No. 220 (lo suficientemente grande para cubrir la parte de botella cortada) comenzar a aplicar fuerza sobre la botella hasta obtener el polvo fino de PET y por debajo colocar el recipiente para que el polvo caiga dentro del mismo, (antes de comenzar se deberá colocar el cubre bocas para evitar aspirar el polvo de PET que suele viajar en el aire debido a la fuerza aplicada).
5. Repetir desde el paso 1 para cada botella a aplicar.

5.2. Modificación de asfalto con PET

Objetivo:

Modificar asfalto para mejorar sus características termo-mecánicas.

Equipo y material a utilizar:

- Balanza analítica
- Una espátula
- Dos soportes universales.
- Un mezclador de diferentes revoluciones.
- Una propela.
- Baño de aceite.
- Reóstato.
- Parrilla de calentamiento.
- Controlador de temperatura.
- Termo par.
- Un sujetador circular.
- Una pinza con nuez.
- Un sujetador para el mezclador
- Un par de guantes de asbesto
- Aceite para automóvil
- PET en polvo
- Muestra de asfalto a modificar

Procedimiento:

1. Sobre uno de los dos soportes universales colocar la parrilla de calentamiento, esta parrilla debe de estar conectada a un Reóstato y éste a su vez al controlador de temperatura.
2. En este mismo soporte en la parte más alta colocar el mezclador con un sujetador y colocar la propela correspondiente para el mezclado.
3. Junto a este primer soporte colocar el segundo, este soporte detendrá el termo-par del controlador de temperatura y la muestra a analizar, la muestra se colocará con la ayuda de un sujetador circular que va sostenido de este soporte universal y que va en dirección donde se colocó la parrilla.
4. Colocar un baño de aceite por encima de la parrilla de calentamiento, se sumergirá la muestra dentro del aceite que se encuentra en el segundo soporte que va en dirección a la parrilla. Se quita el exceso de asfalto con una espátula caliente.
5. Una vez colocado el equipo se enciende el controlador de temperatura y se ajusta a 180 grados centígrados se enciende el reóstato y se ajusta su temperatura aproximadamente a 70 grados centígrados y así la parrilla estará asegurada de que no sobre pase de los 180 grados centígrados.
6. Una vez que la muestra de asfalto comience a fluir colocar dentro de la muestra la propela y elevar a 250 revoluciones por minuto y así comienza el proceso de mezclado.
7. Esperar a que comience a calentar el aceite y por contacto indirecto el asfalto, mientras se espera con la ayuda de una balanza analítica pesar la cantidad de PET deseado para la modificación.
8. Un poco antes de que llegue a la temperatura de 180 grados centígrados comenzar a añadir el polímero poco a poco con la ayuda de una espátula.
9. Esperar a que el reactivo se mezcle perfectamente con la muestra entre 3 a 3 horas y $\frac{1}{2}$.

10. Una vez concluido el proceso, con la ayuda de unos guantes de asbesto sacar la muestra del baño de aceite y verter en una capsula de aluminio para su posterior caracterización



Ilustración 17. Arreglo para la modificación polimérica con PET.



Ilustración 18. Modificación en curso.

5.3. Prueba de penetración

Objetivo:

Determinar el grado de dureza de los ASFALTOS MODIFICADOS

Equipo y material utilizado:

- Equipo de penetración (penetrómetro)
- Pesas para el penetrómetro
- Cápsula de aluminio
- Termómetro
- Baño de agua
- Papel absorbente

Procedimiento:

1. La muestra a analizar se toma de la modificación polimérica y se vacía en una cápsula de aluminio.
2. Se deja enfriar el espécimen hasta que adquiera la temperatura ambiente y luego se coloca en un baño de agua a una temperatura de 25 °C manteniéndolo así el tiempo necesario para que el producto asfáltico adquiera dicha temperatura
3. Se coloca el espécimen bajo el aparato de penetración, se pone la aguja en contacto con la superficie del asfalto y se ajusta la carátula a cero.
4. Asegurarse que el equipo tenga consigo las pesas adecuadas para la prueba. Se deja caer libremente la aguja durante 5 segundos. Al cabo de los cuales se medirá en la carátula la distancia penetrada.
5. Se hacen unas 10 penetraciones, teniendo cuidado de limpiar bien la aguja después de cada ensaye y se toma el promedio de dichas penetraciones como el valor correcto. Si una de las lecturas discrepa mucho se desecha para el cálculo del promedio.
6. La penetración se expresa en décimos de milímetros que se denominan grados de penetración.

Ilustración 19 Penetrómetro.



Ilustración 20 aguja de penetración.



5.4. Punto de reblandecimiento o de fusión

Objetivo:

Determinar la temperatura a la cual fluye un asfalto hasta cierto grado. Esta prueba permite estimar la consistencia de los cementos asfálticos.

Equipo y material a utilizar:

- Vaso de precipitado de 1 litro
- Termómetro
- 2 Esferas de 9.5 milímetros de diámetro y 3.5 gramos de peso.
- 2 Anillos de latón de 15.88 milímetros de diámetro interior y de 6.35 milímetros de altura.
- Soporte de los anillos, el cual debe tener una ménsula a 2.54 centímetros. debajo de los anillos.
- Parilla eléctrica regulable.
- Placa de apoyo, que puede ser de latón o bronce.
- Vaselina o silicón

Procedimiento:

1. Sobre una placa de latón verter un poco de vaselina, se colocan los anillos, en posición invertida y se llenarán con asfalto, el cual haya sido previamente calentado y se dejará enfriar durante una hora.
2. Se quita el exceso de asfalto con una espátula caliente.
3. Se pueden presentar los siguientes casos:
 - a) Si se trata de asfaltos cuyo punto de fusión es menor de 80 °C, se vaciará en el vaso hasta una altura de 8.25 cm, agua destilada a 25 °C. Se introducen las esferas de 3/8" y los anillos con sus respectivas guías, en el agua dejándola descansar en el fondo del vaso y se suspenderá el termómetro de manera que el bulto queda a la misma altura que la cara inferior del anillo y a una separación de 6.35 mm. Se mantendrá la temperatura del agua a 25 °C durante 15 minutos.

Con unas pinzas adecuadas se tomarán las esferas y se colocarán cuidadosamente en el centro de las guías. Ya colocadas las esferas se elevará la temperatura del agua en una relación de 5 °C por minuto. La temperatura que marque el termómetro en el instante en que el asfalto toque la ménsula, se reportará como Punto de Fusión o de Reblandecimiento del asfalto.

b) Si se trata de asfaltos con punto de fusión mayor de 80 °C se sigue el mismo procedimiento anterior solo que se utilizará glicerina químicamente pura en lugar de agua y la temperatura inicial será de 32 °C. La flama se colocará a la mitad de la distancia comprendida entre el centro del vaso y la pared más distante de los anillos.



Ilustración 21. Equipo prueba de ablandamiento.



Ilustración 22. Asfaltos modificados sometidos a la prueba de ablandamiento.



Ilustración 23. Prueba de ablandamiento finalizada.

CAPITULO 6 RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos al someter las muestras de asfalto modificado a las técnicas de caracterización ya mencionadas en un capítulo anterior.

6.1. Concentraciones utilizadas para la modificación.

Se realizaron tres muestras base de polímero + PET en concentraciones de 2, 5 y 10 % $\frac{P}{P}$. A continuación se muestran los cálculos para cada concentración.

$$\% \frac{p}{p} = \frac{\text{peso del soluto}}{\text{peso del soluto} + \text{peso del disolvente}} * 100$$

$$2\% = \frac{\text{peso del soluto}}{\text{peso del soluto} + 40 \text{ g de asfalto}} * 100$$

$$2\% = \frac{0.82 \text{ gramos de PET}}{0.82 \text{ gramos de PET} + 40 \text{ g de asfalto}} * 100$$

$$5\% = \frac{2.11 \text{ gramos de PET}}{2.11 \text{ gramos de PET} + 40 \text{ g de asfalto}} * 100$$

$$10\% = \frac{8.8 \text{ gramos de PET}}{8.8 \text{ gramos de PET} + 80 \text{ g de asfalto}} * 100$$

Para las muestras siguientes se utilizó un segundo co-polímero SBS en concentraciones 1 y 2% para cada una de las tres concentraciones de PET. A continuación, se muestran los cálculos realizados.

$$2\% = \frac{\text{peso del soluto}}{\text{peso del soluto} + 40 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 2% + SBS 1%

$$1\% = \frac{\text{peso del copolimero}}{\text{peso del copolimero} + 40.82 \text{ g de asfalto}} * 100$$

$$1\% = \frac{0.415 \text{ gramos de copolimero}}{0.415 \text{ gramos de copolimero} + 40.82 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 2% + SBS 2%

$$2\% = \frac{0.843 \text{ gramos de copolimero}}{0.843 \text{ gramos de copolimero} + 40.82 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 5% + SBS 1%

$$1\% = \frac{0.45 \text{ gramos de copolimero}}{0.45 \text{ gramos de copolimero} + 42.11 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 5% + SBS 2%

$$2\% = \frac{0.89 \text{ gramos de copolimero}}{0.89 \text{ gramos de copolimero} + 42.11 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 10% + SBS 1%

$$1\% = \frac{0.91 \text{ gramos de copolimero}}{0.91 \text{ gramos de copolimero} + 89.7 \text{ g de asfalto}} * 100$$

PARA ASFALTO + PET 10% + SBS 2%

$$2\% = \frac{1.84 \text{ gramos de copolimero}}{1.84 \text{ gramos de copolimero} + 88.8 \text{ g de asfalto}} * 100$$

6.2. Resultados prueba de penetración.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al someter a las muestras de asfalto modificado con PET a la prueba de penetración, en concentraciones de 2,5 y 10 % como las muestras base y modificadas con Co-polímero SBS a concentración de 1 y 2% para cada una de las tres concentraciones de PET a estudiar.

Tabla 17. Prueba de penetración asfalto PET 2%.

No. Prueba PET 2% +asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	37
Ensaye No 2	37
Ensaye No 3	38
Ensaye No 4	36
Ensaye No 5	37
Ensaye No 6	38
Ensaye No 7	38
Ensaye No 8	39
Ensaye No 9	37
Ensaye No 10	38

Valor promedio: $38 \frac{1}{10} mm$

Tabla 18. Prueba de penetración asfalto PET 5%.

No. Prueba PET 5% + asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	36
Ensaye No 2	35
Ensaye No 3	35
Ensaye No 4	35
Ensaye No 5	36
Ensaye No 6	36
Ensaye No 7	36
Ensaye No 8	35
Ensaye No 9	36.5
Ensaye No 10	37

Valor promedio: $36 \frac{1}{10} mm$

Tabla 19. Prueba de penetración asfalto PET 10%.

No. Prueba PET 10 % + asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	32
Ensaye No 2	31
Ensaye No 3	32
Ensaye No 4	31
Ensaye No 5	31
Ensaye No 6	32
Ensaye No 7	31
Ensaye No 8	31
Ensaye No 9	32
Ensaye No 10	31

Valor promedio: $31 \frac{1}{10} mm$

Tabla 20. Prueba de penetración asfalto PET 2% Co-polímero 1%.

No. Prueba PET 2 % + Polímero 1% Asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	35
Ensaye No 2	36
Ensaye No 3	35
Ensaye No 4	34
Ensaye No 5	35
Ensaye No 6	35
Ensaye No 7	36
Ensaye No 8	35
Ensaye No 9	35
Ensaye No 10	34

Valor promedio: $35 \frac{1}{10} mm$

Tabla 21. Prueba de penetración asfalto PET 2% Co-polímero 2%.

No. Prueba PET 2 % + Polímero 2% asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	31
Ensaye No 2	32
Ensaye No 3	33
Ensaye No 4	33
Ensaye No 5	32
Ensaye No 6	33
Ensaye No 7	32
Ensaye No 8	31
Ensaye No 9	32
Ensaye No 10	32

Valor promedio: $32 \frac{1}{10} mm$

Tabla 22 .Prueba de penetración asfalto PET 5% Co-polímero 1%.

No. Prueba PET 5 % + Polímero 1% asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	29
Ensaye No 2	30
Ensaye No 3	29
Ensaye No 4	29
Ensaye No 5	29
Ensaye No 6	30
Ensaye No 7	29
Ensaye No 8	30
Ensaye No 9	30
Ensaye No 10	29

Valor promedio: $29 \frac{1}{10} mm$

Tabla 23. Prueba de penetración asfalto PET 5% Co-polímero 2%.

No. Prueba PET 5 % + Polímero 2% asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	29
Ensaye No 2	28
Ensaye No 3	29
Ensaye No 4	28
Ensaye No 5	27
Ensaye No 6	27
Ensaye No 7	27
Ensaye No 8	28
Ensaye No 9	28
Ensaye No 10	27

Valor promedio: $27 \frac{1}{10} mm$

Tabla 24. Prueba de penetración asfalto PET 10% Co-polímero 1%.

No. Prueba PET 10 % + Polímero 1% asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	26
Ensaye No 2	27
Ensaye No 3	27
Ensaye No 4	26
Ensaye No 5	26
Ensaye No 6	25
Ensaye No 7	25
Ensaye No 8	25
Ensaye No 9	25
Ensaye No 10	26

Valor promedio: $26 \frac{1}{10} mm$

Tabla 25. Prueba de penetración asfalto PET 10% Co-polímero 2%.

No. Prueba PET 10 % + Polímero 2% asfalto	Grado de penetración $\frac{1}{10} mm$
Ensaye No. 1	23
Ensaye No 2	24
Ensaye No 3	23
Ensaye No 4	22
Ensaye No 5	23
Ensaye No 6	22
Ensaye No 7	23
Ensaye No 8	23
Ensaye No 9	22
Ensaye No 10	22

Valor promedio: $23 \frac{1}{10} mm$

Asfalto adicionado con PET. La tabla siguiente muestra los resultados ordenados de la prueba de penetración, observando en el cuadro la primera muestra es de asfalto PG 64 y tres muestras modificadas solo con PET.

Tabla 26. Resultados obtenidos en la prueba de penetración.

Tipo asfalto	%M/M PET	PE (1/10 mm)
COMUN	0	43.80
PET 01	2	38
PET 02	5	36
PET 03	10	31

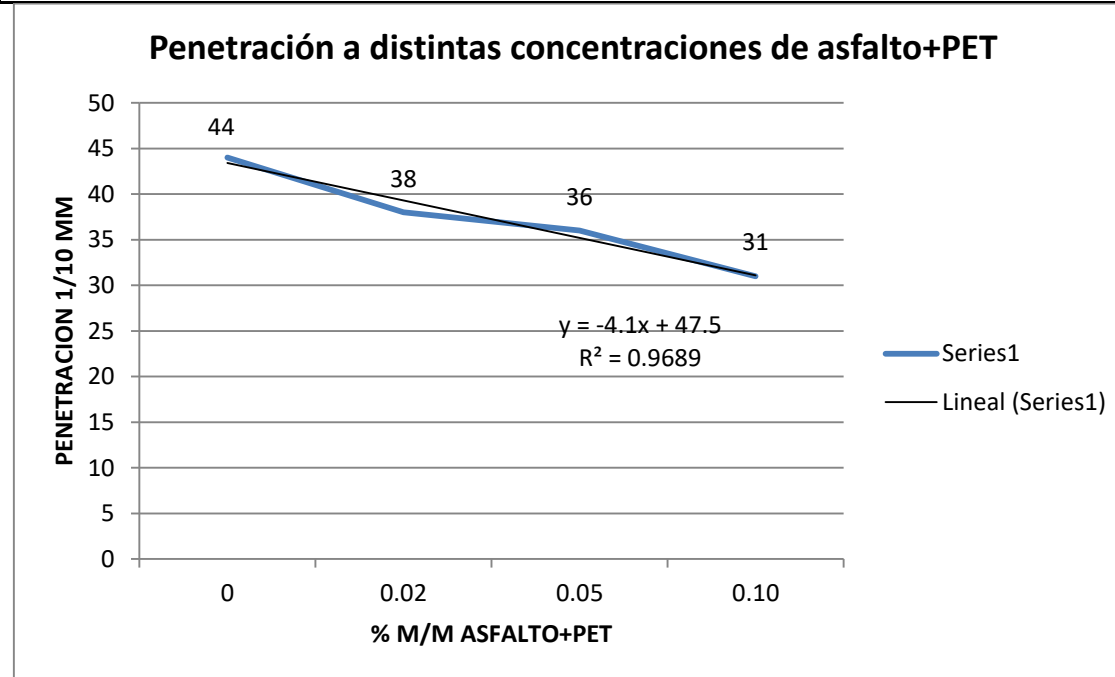


Ilustración 24. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET

PET-polímero di bloque SB al 1%. En el cuadro siguiente se presentan la penetración de tres muestras, una de asfalto común y dos con distintas concentraciones de PET y POLIMERO SB.

Tabla 27. Resultados obtenidos en la prueba de penetración con polímero SB al 1%.

Tipo de asfalto	Concentración de PET	Concentración DE CO-polímero SB	PE
COMÚN	0	0	44
PET 01	2	1	35
PET 02	5	1	29
PET 03	10	1	26

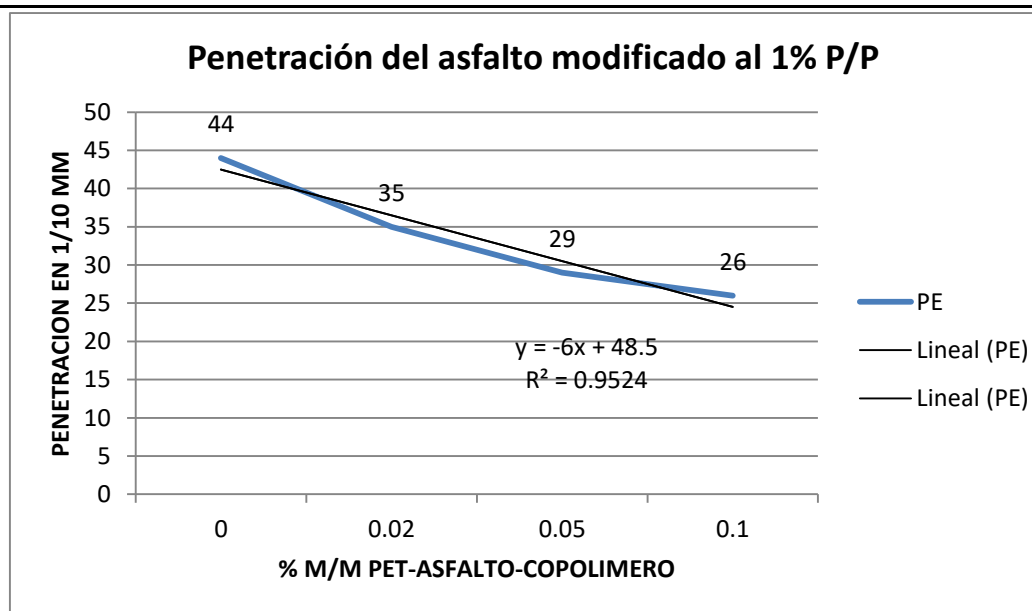


Ilustración 25. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET-Co-polímero 1%

PET-polímero di bloque SB al 2%. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al someter a tres muestras de Asfalto + PET a la prueba de penetración ahora cambiando la concentración de Co-polímero di bloque.

Tabla 28 resultados de la prueba de penetración con polímero SB 2%

Tipo de asfalto	Concentración de PET	Concentración de Co-polímero SB	PE
COMÚN	0	0	44
PET 01	2	2	32
PET 02	5	2	27
PET 03	10	2	23

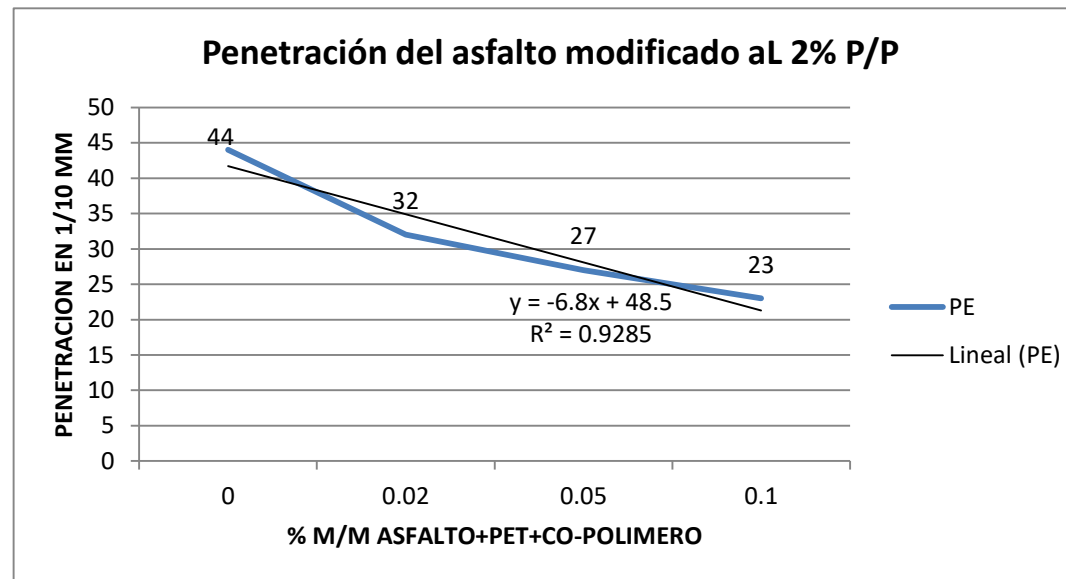


Ilustración 26. Resultados de la prueba de penetración asfalto-PET-Co-polímero 2%

Para cada una de las gráficas, se agregó la línea de tendencia y los valores de Y y R que corresponden a las series de datos presentadas al mantener la proporción de CO-POLÍMERO constante en las muestras, estas corresponden a la ecuación:

$$y = mx + b$$

Donde:

Y es la penetración en 1/10 mm

X es al porcentaje de peso de co-polímero en la mezcla

Para la ecuación anterior los valores de pendiente y ordenada al origen son:

$$m = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ mm}}{\% \frac{m}{m} \text{ de copolimero di bloque}}$$

$$b = (1 \times 10^{-3} \text{ mm})$$

De acuerdo con el valor de R arrojados en cada una de las gráficas, se puede concluir que la disminución de la penetración es directamente proporcional al aumentar la concentración de PET y de Co-polímero di bloque a la mezcla.

4.3. Resultados Pruebas de punto ablandamiento o de fusión.

La Norma ASTM D36 menciona que para considerar que el asfalto modificado cambió sus propiedades termo-mecánicas deberá haber una diferencia de al menos dos grados Celsius entre el asfalto original y el modificado.

Con base a este criterio, se obtiene que las muestras modificadas en este estudio alcanzan y superan los dos grados de diferencia, así concluimos que el asfalto cambió en sus propiedades termo-mecánicas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al someter al asfalto modificado con PET a la prueba de ablandamiento.

Tabla 29. Temperatura de ablandamiento para muestras base pet/asfalto.

Tipo asfalto	%P/P PET	TA (°C)
COMÚN	0	49
PET 01	2	51
PET 02	5	54
PET 03	10	62

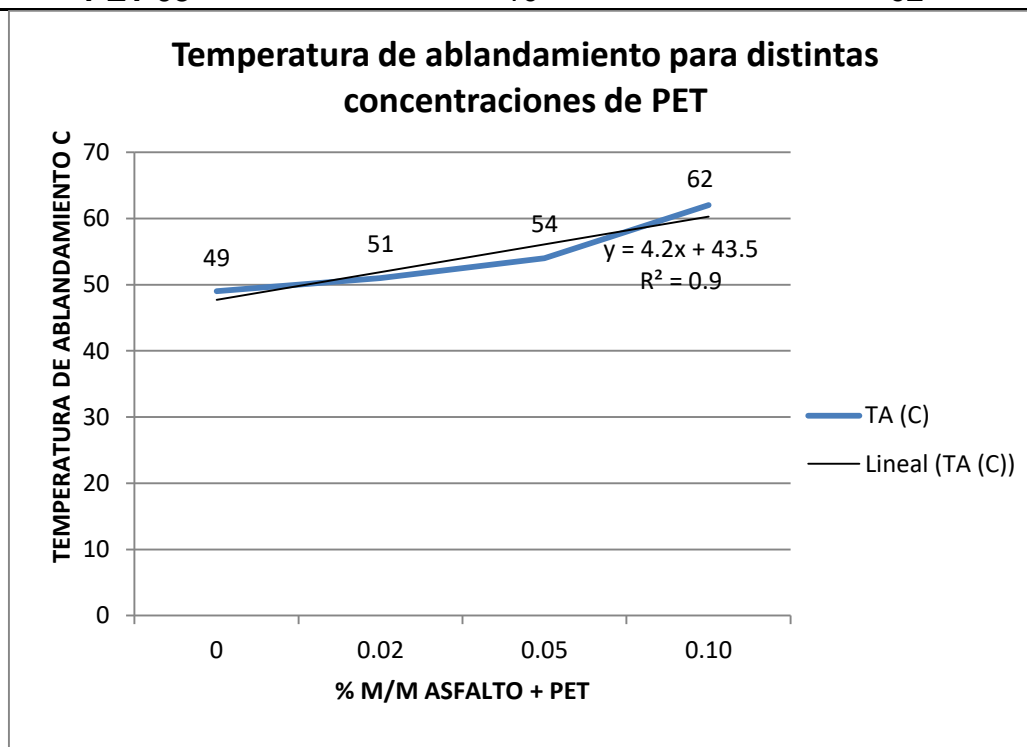


Ilustración 27. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET.

Abajo se presentan cuatro muestras de asfalto a distintas concentraciones de PET-polímero SB en las cuales se reportan las temperaturas de ablandamiento que corresponden a las obtenidas experimentalmente.

Tabla 30 Temperatura de ablandamiento para muestras PET/asfalto/polímero SB al 1%.

Tipo de asfalto	Concentración de PET	Concentración de Co-polímero SB	TA (°C)
COMÚN	0	0	49
PET 01	2	1	56
PET 02	5	1	58
PET 03	10	1	72

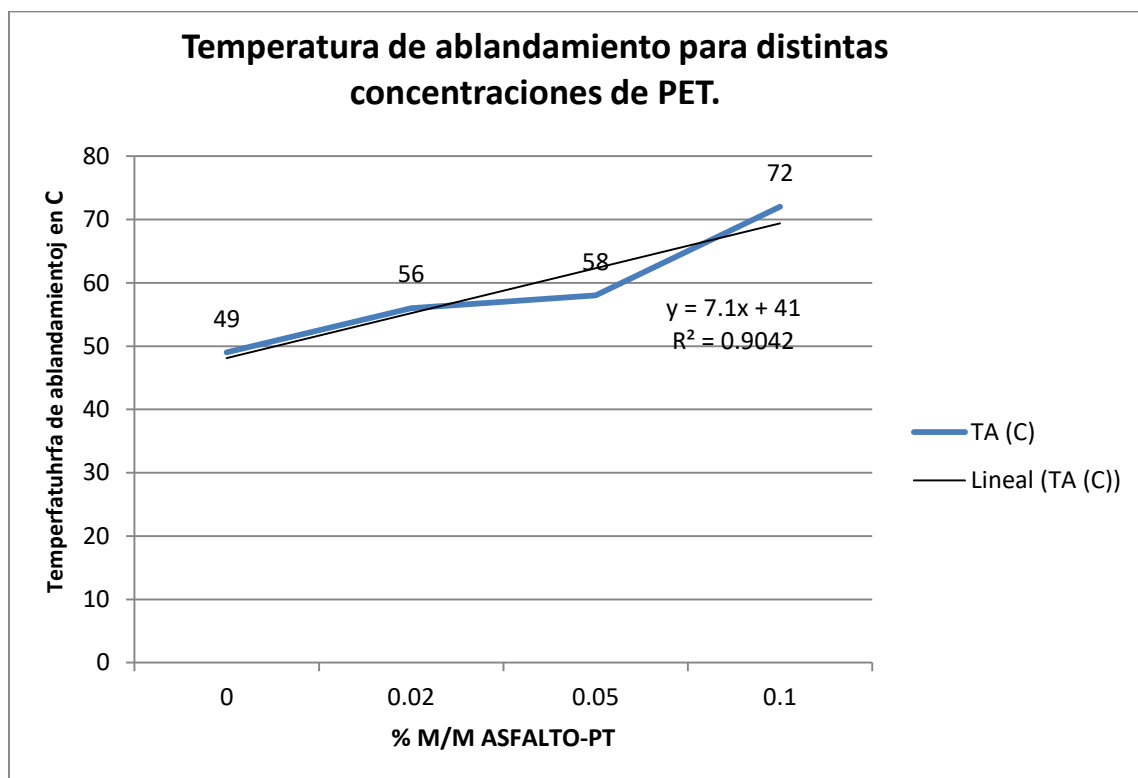


Ilustración 28. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET y polímero SB al 1%.

En la siguiente tabla se presentan cuatro muestras de asfalto-PET-polímero a distintas concentraciones con sus respectivos valores de temperatura de ablandamiento obtenidos a distintas concentraciones.

Tabla 31. Temperatura de ablandamiento para muestras PET/asfalto/polímero SB.

Tipo de asfalto	Concentración de PET %	Concentración de Co-polímero SB	TA(°C)
COMÚN	0	0	49
PET 01	2	2	58
PET 02	5	2	62
PET 03	10	2	74

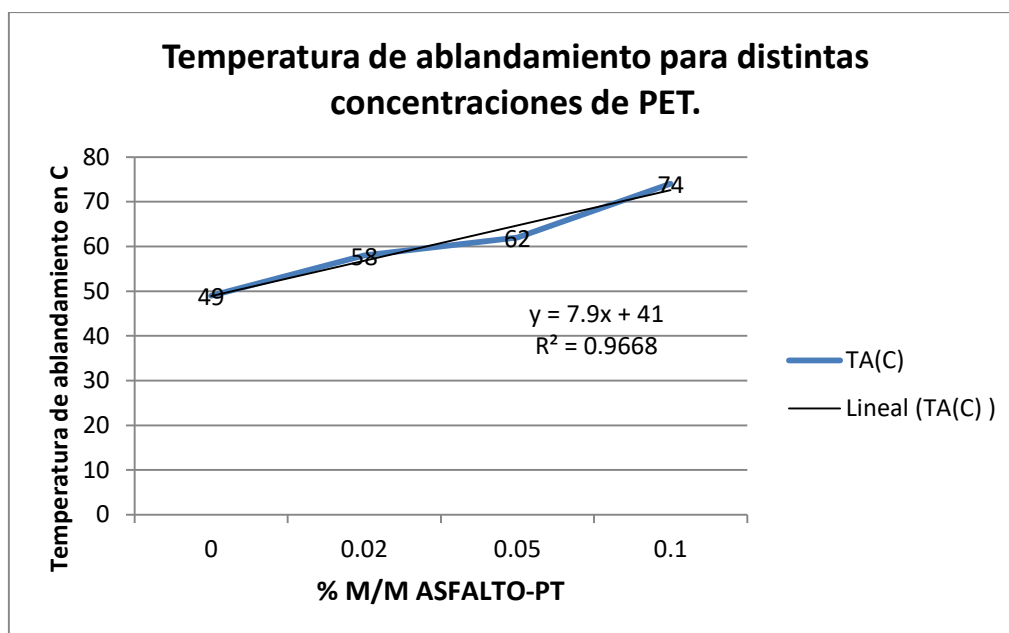


Ilustración 29. Temperatura de ablandamiento para muestras modificadas con PET y polímero SB al 1%.

De igual manera que con la prueba de penetración, para cada una de las gráficas de temperatura de ablandamiento, se agregaron las líneas de tendencia y los valores de Y y R que corresponden a las series de datos presentados. Al mantener la proporción de CO-POLIMERO constante en las muestras, estas corresponden a la ecuación:

$$y = mx + b$$

Donde:

Y es la temperatura de ablandamiento en grados Celsius

X es al porcentaje de peso de co-polímero en la mezcla

Para la ecuación anterior los valores de pendiente y ordenada al origen son:

$$m = \frac{1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}}{\% \frac{m}{m} \text{ de co - polímero di bloque}}$$

$$b = (1 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C})$$

Los valores de R dados como resultado de la línea de tendencia aproximadamente son de 0.9, dado que son datos experimentales y pueden llegar a tener variación entre ellos, podemos interpretar que la línea de tendencia corresponde a una recta.

De acuerdo con el valor de R arrojados en cada una de las gráficas, se puede concluir que el aumento en la temperatura de ablandamiento es directamente proporcional al aumento de la concentración de PET y de Co-polímero di-bloque a la mezcla.

6.4. Puntos importantes a considerar en la obtención del PET en polvo.

- Como se mencionó en la metodología cualquier botella de PET transparente es ideal, aunque la eficiencia por botella, por marca y por diseño del envase cambia.
- Respecto a la eficiencia por botella y marca, con las botellas de refresco “COCA-COLA” se obtuvo más PET en polvo a diferencia de otras botellas de refresco; aproximadamente por cada botella de PET “COCA-COLA” de 1 litro se obtuvo entre 0.35 a 0.4 gramos, en contraste con otras marcas como “PEÑAFIEL”, que se obtuvo por cada botella de 600 ml una cantidad de PET de 0.1 gramos, o con la marca “JARRITOS” que de la botella de 2 litros se obtuvo 0.3 gramos.
- En cuanto al diseño de las botellas, en algunos casos era más difícil obtener el PET lijado, debido a que se atoraba en las superficies de las botellas con muchos detalles y por lo general ese PET se desperdiciaba en el ambiente, tal es el caso de las botellas de la marca FANTA.
- Es indispensable que la lija sea del tamaño indicado en la metodología (lija de agua del número 220) dado que las lijas con un tamaño de partícula mayor se quiebran y como consecuencia contaminan el PET o lijas con menor tamaño de partícula no llegan a cubrir las necesidades de raspado del PET.



Ilustración 30. PET en polvo.

6.5. Cálculo del índice de penetración.

La norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación del índice de penetración, IP, de los cementos asfálticos.

Este índice, concebido por Pfeiffer y Van Doormal, se calcula a partir de los valores de la penetración a 25°C 100 g y 5 segundos y del punto de ablandamiento los cuales proporcionan un criterio de medida de la susceptibilidad térmica de estos materiales.

El fundamento del método de obtención del IP se basa en admitir, primero, que a la temperatura del punto de ablandamiento (anillo y bola) y la penetración de un cemento asfáltico es de 8 mm, segundo, que los valores de la penetración en función de la temperatura se representan por una línea recta, cuya pendiente B viene definida por la ecuación dada a continuación y, tercero, atribuirle un IP igual a cero a un cemento asfáltico con una penetración de 200 x 0.1 mm (es el resultado obtenido que se usa como base para el nomograma cuando el IP es igual a 0) a 25 °C y un punto de ablandamiento a 40° C.

$$B = \frac{\log\left(\frac{800}{PEN\ 25\ C}\right)}{TAB - 25\ C}$$

$$IP = \frac{20 - (500 * B)}{1 + (50 * B)}$$

6.6. Nomograma de Heukelom.

El Nomograma de Heukelom, tal como muestra la ilustración 31, tiene en la abscisa principal una escala lineal de temperatura y en las ordenadas dos escalas logarítmicas: una, del lado izquierdo es donde encontramos los valores del Punto de Ablandamiento de anillo y bola y del otro lado podemos encontrar otra para la penetración. El diagrama se completa con una línea recta inclinada dando la escala del Índice de Penetración.

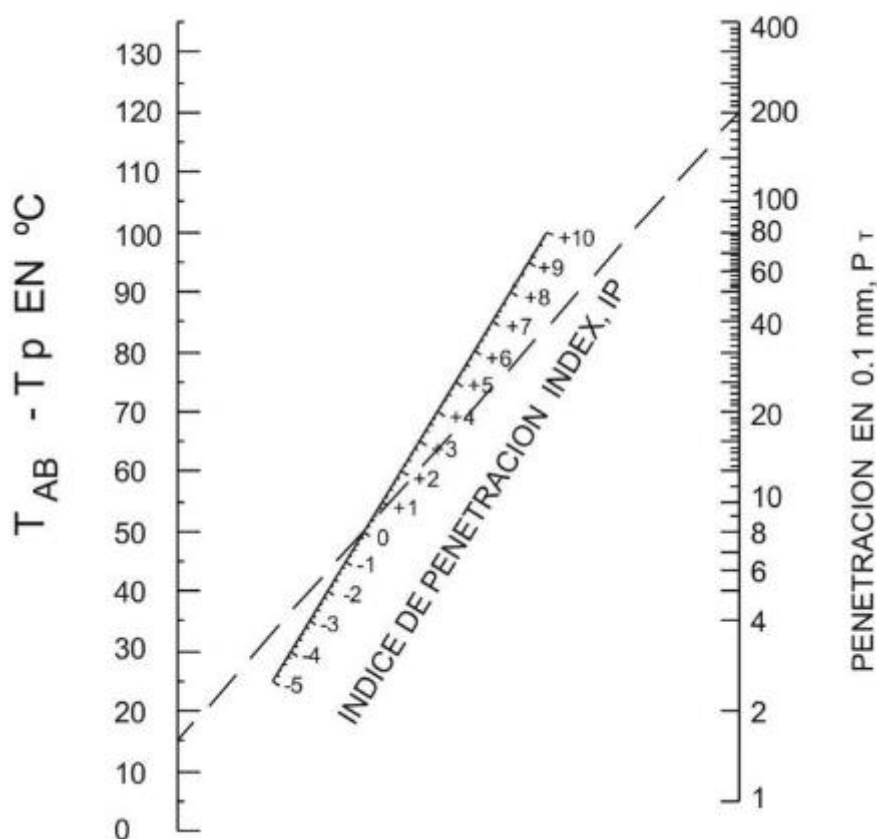


Ilustración 31. Nomograma de Heukelom, lectura hecha a 40 °C como temperatura de ablandamiento y 200 como penetración a 25 °C.

Una vez explicados estos dos métodos de cálculo del índice de penetración, a continuación, se presentarán tres tablas con los resultados obtenidos al realizar los cálculos con las ecuaciones expuestas anteriormente.

Asfalto adicionado con PET al 2,5 y 10 % de concentración.

En la tabla 32 se presenta el índice de penetración de cuatro muestras, la primera es asfalto sin modificar, y las siguientes tres muestras son de asfalto adicionado con PET a distintas concentraciones.

Tabla 32. Resultados del índice de penetración PET/asfalto.

Asfalto adicionado con PET						
Muestra	% P/P PET	PEN. a 25 °C	Temp. Ablan.	B	IP	Clasificación
ASFALTO	0	44	48	0,052	-1,7	-1>IP
PET 01	2	38	51	0,05	-1,42	-1>IP
PET 02	5	36	54	0,046	-0,9	-1>IP
PET 03	10	31	62	0,038	0,34	-1<IP<+1

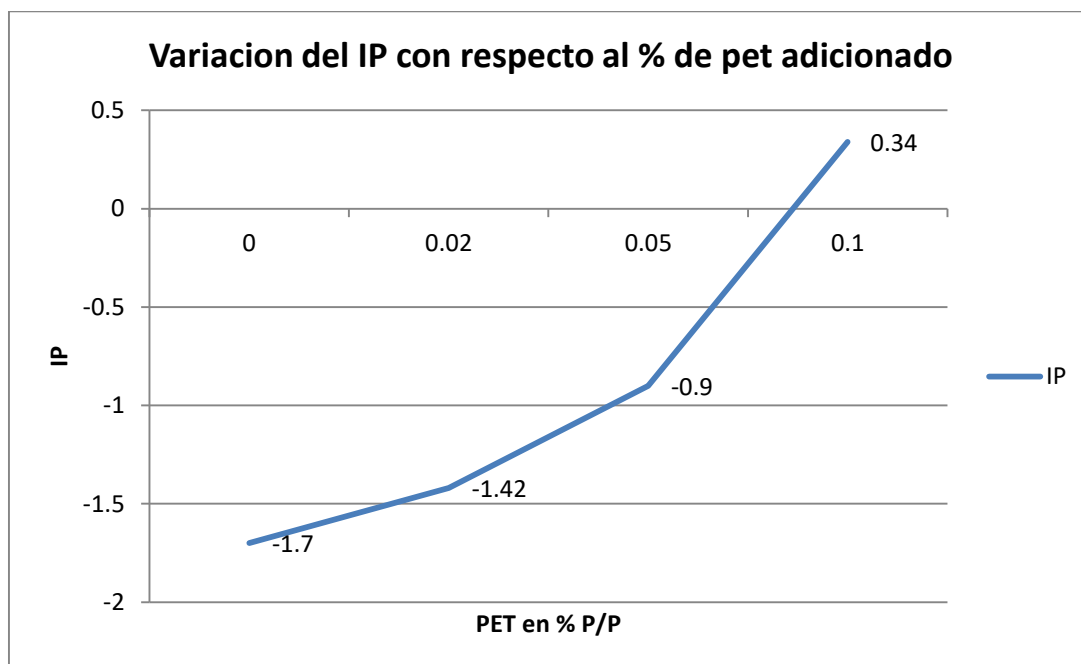


Ilustración 32. Variación del IP con respecto al porcentaje de PET adicionado.

Haciendo el análisis de los resultados las primeras dos modificaciones corresponden según la tabla de clasificación a asfaltos con susceptibilidad térmica y son poco viscosos, en cambio al modificar el asfalto con una concentración de 10% PET corresponde a un asfalto que puede ser utilizado en construcción de carpetas asfálticas.

La gráfica nos muestra que el índice de penetración es directamente proporcional a la cantidad de PET añadida a la mezcla sin la necesidad de añadir un polímero extra a la mezcla.

Asfalto adicionado con PET al 2,5 y 10 % y polímero SB al 1%.

En la tabla 33. Se presentan cuatro muestras de las cuales la primera es de asfalto sin ningún tipo de aditivo, y las siguientes tres son de asfalto modificado con PET a distintas concentraciones manteniendo constante la concentración de polímero SB al 1%.

Tabla 33. Resultados del índice de penetración PET/ASFALTO/POLIMERO 1%.

Asfalto adicionado con PET							
Muestra	% P/P PET	% Poli. SB	PEN. A 25 C	Temp. Ablan.	B	IP	Clasificación
Asfalto	0	0	44	48	0,052	-1,7	-1>IP
PET 01	2	1	35	56	0,0438	-0,59	-1>IP
PET 02	5		29	58	0,0436	-0,56	-1>IP
PET 03	10		26	72	0,0316	1,62	+1<IP

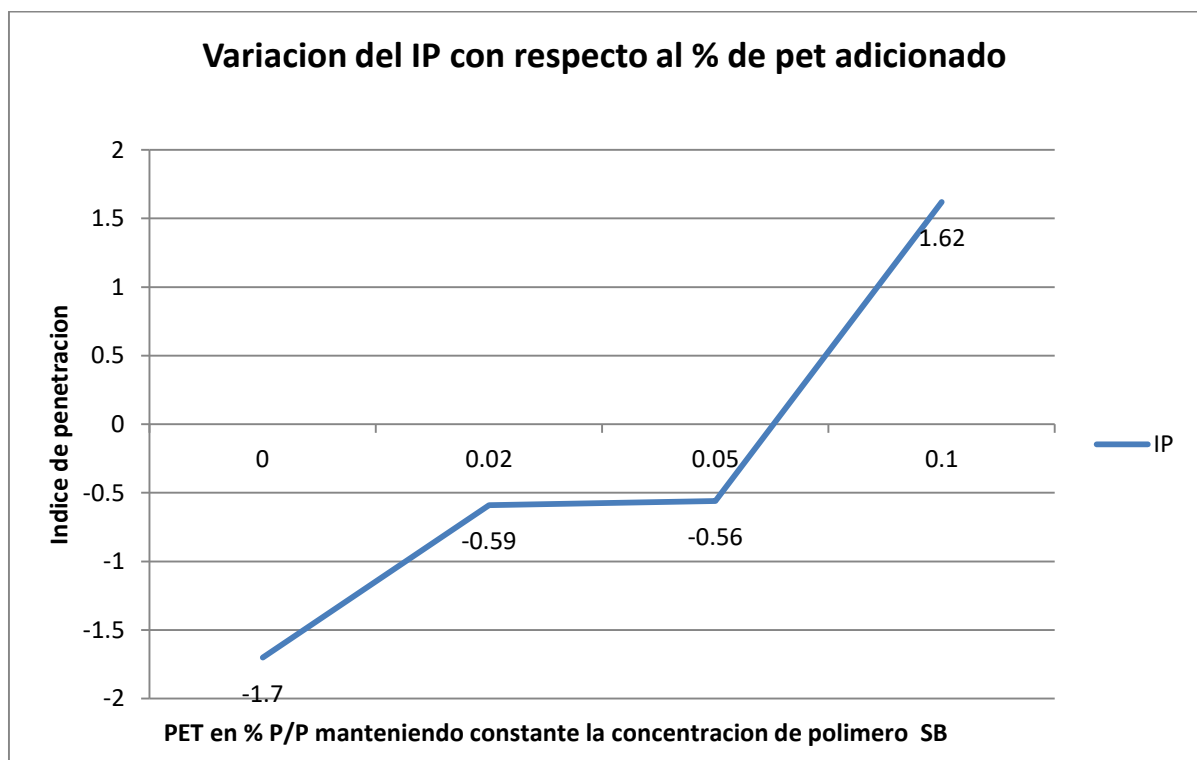


Ilustración 33. Variación del IP con respecto al % de PET y Co-polímero SB 1% adicionado.

Haciendo el análisis de los resultados obtenidos podemos observar que entre la primera y la segunda muestra no existe un cambio muy significativo en el índice de penetración y que el hecho de añadir un polímero extra en una concentración baja a la mezcla no es de mucha consideración en concentraciones de PET cercanas entre sí a diferencia de la última muestra, en la cual se nota un incremento considerable del índice de penetración.

Aun así, el índice de penetración sigue aumentando conforme aumenta la concentración de polímeros, aunque de una manera distinta al asfalto que solo contiene PET como polímero modificador.

También podemos deducir que a diferencia de los resultados de las muestras anteriores, estos nuevos datos nos arrojan que: las mezclas de asfaltos-polímero en este caso son susceptibles a la temperatura, a excepción de la muestra de más alta concentración, que es térmicamente más resistente que las ya mencionadas, además ninguna de las muestras modificadas cumple con los requisitos para ser usadas para la construcción de carpetas asfálticas, y así se comienza a notar la relación que existe entre la temperatura de ablandamiento y la prueba de penetración.

Asfalto adicionado con PET al 2,5 y 10 % y polímero SB al 2%.

En la tabla 34 se presentan cuatro muestras, la primera es de asfalto sin ningún tipo de modificación y las siguientes tres corresponden a asfalto modificado con distintas concentraciones de PET, manteniendo la concentración de polímero SB al 2% constante.

Tabla 34. Resultados del índice de penetración PET/asfalto/polímero 2%.

Asfalto adicionado con PET							
Muestra	% P/P PET	%Poli. SB	PEN. A 25 °C	Temp. Ablan.	B	IP	Clasificación
Asfalto	0	0	44	48	0,052	-1,7	-1>IP
PET 01	2	2	32	58	0,0421	-0,3381	-1>IP
PET 02	5		27	62	0,0397	0,05	-1<IP<+1
PET 03	10		23	74	0,0314	1,67	+1<IP

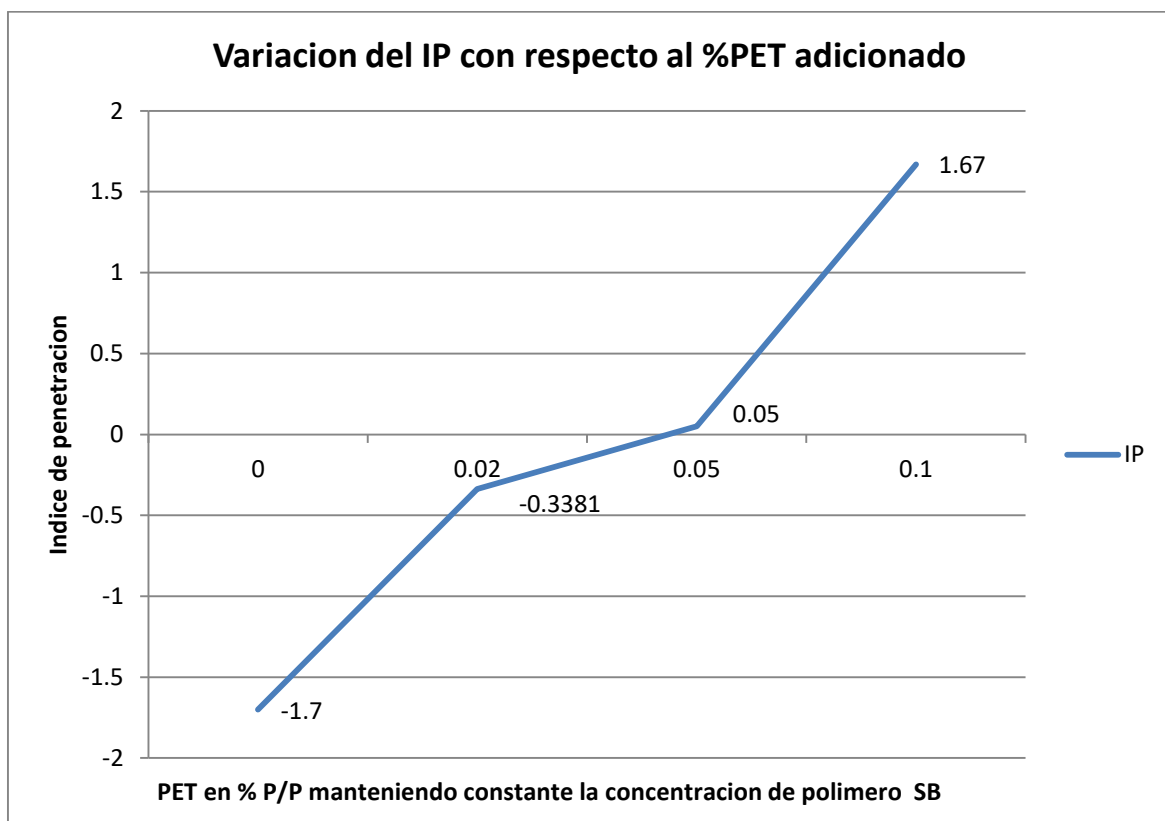


Ilustración 34. Variación del IP con respecto al % de PET y Co-polímero SB 2% adicionado.

De igual manera que en la gráfica anterior, podemos notar que no existe mucha diferencia entre la muestra uno y dos y que incrementa notoriamente el índice de penetración en la siguiente muestra, pero a diferencia de las muestras anteriores hay una mezcla que podemos considerar apta para usarse en la construcción de carpetas asfálticas, es decir hablamos de la muestra que contiene PET en una concentración del 5%, que al comparar dicha muestra con la de la tabla No. 33, vemos que esta nueva modificación ya es apta para construir carpetas asfálticas, lo que nos indica que el incremento en la concentración de polímero SB ayuda a obtener una mezcla asfáltica menos susceptible a la temperatura y apta para usarse en construcción de carreteras.

CONCLUSIONES.

La modificación del asfalto PG-22, con polímeros SBS y con PET, produce cementos asfálticos con mayor resistencia,

La penetración disminuye en forma directamente proporcional a la cantidad añadida de PET en las mezclas ASFALTO- PET.

En el caso de la temperatura de ablandamiento, esta aumenta en forma directamente proporcional a la cantidad añadida de PET en las mezclas ASFALTO- PET

Se puede observar también que la adición de un polímero di-bloque a la mezcla de ASFALTO- PET ayuda a mejorar las características termomecánicas, en comparación de las mezclas sin este tipo de polímero y notamos que se necesita de una concentración mayor de PET para poder igualar las mezclas a las que se les añadió un polímero di-bloque.

Por los motivos anteriores y de acuerdo a los resultados obtenidos, el incremento del índice de penetración es directamente proporcional a la cantidad de PET añadido, en relación a la disminución del índice de penetración y al aumento de la temperatura de ablandamiento.

Para el caso donde la concentración de PET es del 10 % m/m en la cual se obtiene una mezcla ASFALTO- PET con buena estabilidad de acuerdo al resultado obtenido de índice de penetración, es decir, que en esta concentración de PET las muestras modificadas son aptas para su utilización en la construcción de carreteras.

Cabe añadir que la concentración de PET 10 % m/m puede reducirse, si se añade un polímero di-bloque a la mezcla, en el caso específico en donde la concentración de PET es del 5 % m/m la del polímero di-bloque es del 2% m/m se obtiene una mezcla apta para emplearse en la construcción de carreteras de acuerdo con la normatividad

Aunque el motivo de este proyecto no se enfoca en el reciclaje del PET, pero ya que es un material que abunda en nuestro país, se tiene una nueva

propuesta de reciclaje y se espera que en un futuro un porcentaje de lo que se recicla se pueda asignar para el mejoramiento de asfaltos y así seguir contribuyendo de manera positiva al medio ambiente

Con esto, se puede concluir que la modificación de asfaltos con polímeros resulta muy útil y que en la República Mexicana no se puede utilizar indistintamente un solo tipo de asfalto debido a las condiciones climatológicas existentes y a la demanda de carga vehicular que se vive en el país.

Trabajos citados y Bibliografía

1. Abraham, P. R. (2006). *Manual de practicas de Laboratorio de Pavimentos*. Mexico: Facultad de Ingenieria UNAM.
2. Anderson, B. (septiembre de 2015). *cronica ambiental*. Recuperado el agosto de 2017, de cronica ambiental:
<https://www.cronicaambiental.com.mx/nacional/mexico-es-lider-en-reciclaje-de-pet/>
3. Billmeyer, F. W. (2004). *Ciencia de los Polimeros*. New York: Reverte.
4. C., K. P. (2006). *Quimica Organica*. Mexico: Omega.
5. Carpio, M. R. (2002). *Ingenieria de los materiales plasticos*. Mexico: Diaz de Santos.
6. E., C. (2000). *Quimica de los polimeros*. Barcelona, España: Reverte.
7. Esparza, D. A. (2005). *Metodologia de la investigacion*. Mexico. D.F.: RESTAURO.
8. Flores, U. H. (2013). *Diseño de una recicladora de PET*. E.U.A.: Palibrio.
9. Groover, M. P. (2005). *Fundamentos de manufactura moderna*. Mexico D.F.: Pearson Primera Edicion.
10. Herrera, E. (2016). Mexico lider en reciclaje de envases de PET: ECOCE. *Milenio*, 50.
11. Herrera, L. A. (2007). *Estudio del comportamiento termo-mecanico de asfaltos modificados con un polimero lineal dibloque*. Mexico. D.F.: UNAM FACULTAD DE QUIMICA.
12. Hodgson, J. (2001). *Muestreo y descripcion de suelos*. España: Reverte.
13. Institute, A. (2008). *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture*. Lexington, EUA: K.Y.
14. Jr., L. N. (2005). *Quimica Organica*. Hispanoamerica: Prentice-Hall.
15. Marias, P. M. (2007). *Quimica y Fisica de los altos Polimeros y materias plasticas*. Mexico: ALHAMBRA.
16. Materials, T. A. (1986). *Standard testmethod for penetration of Bituminous Materials*. E.U.A.: ASTM D5.
17. Materials, T. A. (1986). *TestStandard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus)*. E.U.A.: ASTM D36.

18. Materials, T. A. (1986). *Test Standard method for softening point of bitumen (Ring and Ball Apparatus)*. E.U.A.: ASTM D36.
19. Materials, T. A. (1991). *Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. E.U.A.: ASTM D8.
20. Morrison, R. T. (2000). *Química Organica*. Barcelona, España: Pearson.
21. N., R. (2000). *Emulsiones Asfálticas*. Mexico: Company Mexico.
22. N., R. (2000). *Emulsiones Asfálticas*. California, E.U.A.: Company.
23. Oficial, D. (31 de Mayo de 2005). *Normas IMT MX*. Recuperado el Junio de 2017, de Normas IMT MX: normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-004-05.pdf
24. Oficial, D. (27 de Enero de 2012). *sct.gob*. Recuperado el Mayo de 2017, de sct.gob: www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAF/NOM-002-SCT-2011.pdf
25. R., B. (2008). *Emulsiones Asfálticas usos y rompimientos*. Universidad de los Andes: Andes.
26. R., S. (2002). *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. Mexico: Pearson.
27. Rafael, L. L. (FEBRERO de 2008). *IMCYC*. Recuperado el SEPTIEMBRE de 2017, de IMCYC: mcy.com/.../Asfalto/Aprovechamiento%20y%20tendencias%20de%20desarrollodelosasfaltosenmexico
28. Solomons, G. (2001). *Química Organica*. South Florida: Limusa.
29. Transportes, S. d. (9 de Febrero de 2012). *Normas IMT.MX*. Recuperado el Julio de 2017, de Normas IMT.MX: normas.imt.mx/normativa/N-CMT-4-05-003-02.pdf
30. Uriel, E. (2013). *Estudio de asfalto modificado con polímero tipo SBS y micro-esfera de óxido de silicio*. Mexico. D.F.: Facultad de Química UNAM.