



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON
PORCENTAJES DE 2 %,4 % Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Jorge Mario Payés Roldán

Asesorado por el Ing. Allan Giovanni Veliz Pérez

Guatemala, noviembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON
PORCENTAJES DE 2 %,4 % Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JORGE MARIO PAYÉS ROLDÁN

ASESORADO POR EL ING. ALLAN GIOVANNI VELIZ PÉREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO A.I.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Paola Judith Pérez Urquizú
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Arriola Donis
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON PORCENTAJES DE 2 %,4 % Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 25 de agosto de 2017.

Jorge Mario Payés Roldán

Guatemala, 15 de junio de 2023

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Montenegro:

Por este medio me dirijo a usted para informarle que, en calidad de asesor, he revisado el trabajo de graduación titulado: **“POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON PORCENTAJES DE 2%, 4% Y 6% PARA MEZCLAS ASFÁTICAS”** elaborado por el estudiante Jorge Mario Payés Roldán con carné 200818915, tema para el cual fui asignado como asesor.

Considero que se han cumplido las metas propuestas al inicio del trabajo, por lo que recomiendo se apruebe en el entendido del que el autor y el suscrito son responsables de lo trabajado y de las conclusiones de este.

Atentamente,


Allan Giovanni Veliz Pérez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 18,655
Inge. Allan Giovanni Veliz Pérez
Colegiado No. 18656

Guatemala, 19 de octubre de 2023

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación "POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON PORCENTAJES DE 2%,4% Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS" desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, Jorge Mario Payés Roldán, quién contó con la asesoría del Ing. Allan Giovanni Veliz Perez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.



LNG.DIRECTOR.234.EIC.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON PORCENTAJES DE 2 %, 4 % Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS**, presentado por: **Jorge Mario Payés Roldán** , procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, noviembre de 2023





Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.746.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **POLIBUTADIENO COMO ADITIVO MODIFICADOR DE RESISTENCIA CON PORCENTAJES DE 2 %, 4 % Y 6 % PARA MEZCLAS ASFÁLTICAS**, presentado por: **Jorge Mario Payés Roldán**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera

Decano a.i.

Guatemala, noviembre de 2023

JFGR/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por tener misericordia de mí y cosechar tantos logros en mi vida ya que sin él no fuera posible llegar a este momento.

Mis padres

Aníbal Payés, Irma Roldán, por su dedicación, esfuerzo y por todo el sacrificio realizado por mi día con día

Mis hermanas

Karen y Paola Payés, por su consejos y apoyo durante este largo camino.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme la oportunidad de formarme como profesional, por ser un hogar para mi durante mucho tiempo y darme las herramientas necesarias para poder sobresalir en esta vida.

**Sección de Mecánica
de Suelos**

Ing. Medrano, Moisés Mejía, Byron Vielman, Mynor Castillo, por el apoyo y amistad brindado durante todo el proceso de ensayos.

Ing. José Salán

Por brindarme su amistad y por apoyarme en este proceso de graduación en todo momento, por ser como un hermano para mí.

Mis amigos

Por el apoyo, por su amistad durante todo el tiempo que me llevo concluir la carrera.

Mis catedráticos

Por compartir todos sus conocimientos desinteresadamente y por tener esa vocación de enseñar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Polibutadieno.....	1
1.1.1. Tipos de polibutadieno.....	4
1.1.1.1. Látex.....	5
1.1.1.2. Caucho natural	8
1.1.1.3. Caucho sintético	10
1.1.1.4. SBR	13
1.1.1.5. SBS	15
1.1.2. Procesos de producción polibutadieno	18
1.1.3. Características del polibutadieno.....	21
1.1.3.1. Consistencia	22
1.1.3.2. La exudación	24
1.1.3.3. Segregación.....	26
1.1.3.4. Resistencia	27
1.1.3.5. Densidad	29
1.1.3.6. Durabilidad.....	30
1.2. Asfaltos.....	32
1.2.1. Peso específico del asfalto	34
1.3. Ensayos.....	35

1.3.1.	Estabilidad y flujo Marshall	37
1.3.1.1.	Densidad de mezclas bituminosa (Bulk) AASHTO T 166	40
1.3.1.2.	Densidad teórica máxima (RICE) AASHTO T 209-05	41
1.3.1.3.	Ensayo de Stripping (adherencia) AASHTO T283-19	43
2.	MARCO METODOLÓGICO	47
2.1.	Materiales utilizados.....	47
2.2.	Cemento asfáltico AC-30	48
2.3.	Agregado grueso.....	51
2.4.	Agregado fino (arena de rio)	54
2.5.	Polibutadieno	55
2.6.	Diseño teórico para la mezcla de asfáltica	59
2.6.1.	Mezcla asfáltica patrón.....	59
2.6.2.	Mezcla asfáltica modificada con polibutadieno.....	60
2.7.	Ensayos de laboratorio.....	64
2.7.1.	Preparación de probetas de mezcla asfáltica en caliente AASHTO T 245 y ASTM D 1559	65
2.7.1.1.	Metodología para preparación de probetas	67
2.7.2.	Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica.....	72
2.7.2.1.	Metodología.....	73
2.7.3.	Gravedad específica teórica máxima rice.....	74
2.7.3.1.	Metodología.....	74
2.7.4.	Porcentaje de vacíos-densidad de mezcla asfáltica	79
2.7.4.1.	Metodología.....	79

2.7.5.	Prueba de estabilidad-flujo Marshall.....	80
3.	RESULTADOS.....	85
3.1.	Mezcla patrón.....	85
3.1.1.	Gravedad específica Bulk ASTM D 2726 y ASTM D 1188.....	87
3.1.1.1.	Gravedad específica.....	87
3.1.1.1.1.	Gravedad específica Bulk promedio.....	88
3.1.2.	Gravedad Teórica Máxima Rice ASTM D 2041 y AASHTO T 209.....	89
3.1.3.	Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 2303 y AASHTO T 269.....	90
3.1.4.	Estabilidad- flujo Marshall ASTM D 1559 y AASHTO T 245.....	91
3.2.	Mezcla asfáltica modificada con polibutadieno con porcentajes de 2 %,4 % y 6 %.....	92
3.2.1.	Gravedad específica Bulk ASTM D 2726 y ASTM D 1188.....	92
3.2.1.1.	Gravedad específica.....	92
3.2.1.2.	Gravedad específica Bulk promedio	95
3.2.2.	Gravedad teórica máxima Rice ASTM D 2041 y AASHTO T 209.....	97
3.2.3.	Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 2303 y AASHTO T 269.....	99
3.2.4.	Estabilidad – flujo Marshall ASTM D 1559 y AASHTO T245.....	100
3.3.	Gráfico de resistencia a la compresión directa sobre asfalto convencional.....	104

3.3.1.	Gráfico de resistencia a compresión directa sobre mezcla patrón.....	106
3.3.2.	Gráfico de resistencia a la compresión directa sobre asfalto modificado con polibutadieno.....	107
3.3.3.	Gráfico de resistencia de compresión directa en mezcla patrón vs asfalto modificado con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno	111
4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	113
4.1.	Verificación de cumplimiento de parámetros de diseño utilizados en mezcla patrón y mezcla modificada	113
4.1.1.	Gráfico comparativo de resistencia de compresión directa en mezcla patrón vs asfalto modificado con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno, ambas mezclas utilizando bitumen A-30 como ligante asfáltico.....	114
	CONCLUSIONES.....	117
	RECOMENDACIONES	119
	REFERENCIAS	121

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Composición química del polibutadieno	1
Figura 2.	Polibutadieno en neumáticos	3
Figura 3.	Látex de caucho natural atrapado del árbol Hevea brasilienses	8
Figura 4.	Secado de amina de caucho natural	10
Figura 5.	Planchas de caucho sintético	12
Figura 6.	Caucho sintético SBR.....	15
Figura 7.	Lamina de caucho SBS	18
Figura 8.	Colocación de asfalto en carpeta de rodadura	33
Figura 9.	Mezcla Asfáltica.....	48
Figura 10.	Cemento asfáltico AC-30.....	50
Figura 11.	Piedra triturada utilizada como agregado grueso	53
Figura 12.	Arena de rio utilizada como agregado fino	54
Figura 13.	Polibutadieno triturado como agente modificador	58
Figura 14.	Granulometría polibutadieno	61
Figura 15.	Gráfica granulométrica de diseño Marshall optimo.....	64
Figura 16.	Colocación de agregados en taras	67
Figura 17.	Calentamiento de materiales, molde, collas y placa base en horno industrial	68
Figura 18.	Colocación de mezcla asfáltica en moldes de apisonado	70
Figura 19.	Compactación de mezcla asfáltica patrón y mezcla modificada con polibutadieno	71
Figura 20.	Desmoldado de probeta de asfalto.....	72

Figura 21.	Probeta de mezcla patrón sumergida en agua	73
Figura 22.	Colocación de probetas en horno industrial para secado	75
Figura 23.	Desintegración de probeta con espátula	76
Figura 24.	Peso de picnómetro lleno de agua.....	77
Figura 25.	Picnómetro sobre agitador	78
Figura 26.	Colocación de probetas de mezcla patrón en baño maría	81
Figura 27.	Secado de probetas	82
Figura 28.	Colocación de probetas en máquina Marshall	83
Figura 29.	Estabilidad vs. % de Bitumen en mezcla patrón	107
Figura 30.	Estabilidad vs. % de bitumen con 2 % de polibutadieno	108
Figura 31.	Estabilidad vs. % de bitumen con 4 % de polibutadieno	109
Figura 32.	Estabilidad vs. % de bitumen con 6% de polibutadieno	110
Figura 33.	Estabilidad vs % de bitumen	111
Figura 34.	Gráfico comparativo de estabilidad vs. flujo	115

TABLAS

Tabla 1.	Criterio de diseño de mezclas Marshall	39
Tabla 2.	Características físicas del agregado grueso	52
Tabla 3.	Características físicas agregado fino	55
Tabla 4.	Diseño de mezcla patrón con una graduación de granulometría E (12.5 mm)	59
Tabla 5.	Diseño de probeta de mezcla patrón con un peso de 1000 gramos	60
Tabla 6.	Granulometría de polibutadieno	61
Tabla 7.	Diseño de mezclas modificadas con polibutadieno en diferente porcentaje	62
Tabla 8.	Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)	63

Tabla 9.	Diseño granulométrico por el método Marshall	63
Tabla 10.	Datos peso en aire, peso seco saturado, peso sumergido y gravedad específica.....	88
Tabla 11.	Gravedad específica Bulk promedio	89
Tabla 12.	Gravedad teórica máxima Rice para probeta de mezcla Patrón.....	90
Tabla 13.	Porcentaje de vacíos en mezcla asfáltica patrón.....	90
Tabla 14.	Estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica patrón	91
Tabla 15.	Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 2 % de polibutadieno	93
Tabla 16.	Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 4 % de polibutadieno	94
Tabla 17.	Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 6 % de polibutadieno	95
Tabla 18.	Gravedad específica Bulk, modificada con 2 % de polibutadieno	96
Tabla 19.	Gravedad específica Bulk, modificada con 4 % de polibutadieno	96
Tabla 20.	Gravedad específica Bulk, modificada con 6 % de polibutadieno	97
Tabla 21.	Gravedad específica teórica máxima, modificada con 2 % de polibutadieno	98
Tabla 22.	Gravedad específica teórica máxima, modificada con 4 % de polibutadieno	98
Tabla 23.	Gravedad específica teórica máxima, modificada con 6 % de polibutadieno	99
Tabla 24.	% de vacíos en mezcla asfáltica modificada con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno	100

Tabla 25.	Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 2 % de polibutadieno.....	101
Tabla 26.	Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 4 % de polibutadieno.....	102
Tabla 27.	Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 6 % de polibutadieno.....	103
Tabla 28.	Resultados de estabilidad Marshall en muestra patrón.....	106
Tabla 29.	Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 2 % de polibutadieno.....	108
Tabla 30.	Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 4 % de polibutadieno.....	109
Tabla 31.	Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 6 % de polibutadieno.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC-30	Cemento Asfáltico muy viscoso
cm	Centímetro
SBR	Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
°C	Grados centígrados
G_{mb}	Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima Rice de la mezcla asfáltica
Kpa	Kilopascal
lbf	Libras-fuerza
mm	Milímetro
%	Porcentaje

GLOSARIO

AASHTO	Siglas en inglés para la <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> (La Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transporte).
Agregado	Material que ha sufrido un proceso de trituración utilizado como material de construcción.
Asfalto	Mezcla de hidrocarburos compactados.
ASTM	American Society for Testing and Material.
Bitumen	Material liquido obtenido del proceso de destilación total o parcial del petróleo crudo.
Bomba de vacío	Maquina utilizada para extraer moléculas de gas de un volumen sólido.
Carga	Presión o peso que se ejerce sobre un elemento.
Capacidad	Característica don la que cuenta una mezcla asfáltica la cual permite soportar las cargas generadas por el tráfico.

Caucho	Polímero elástico de color blanco que se obtiene de la savia proporcionada por el árbol Hevea Brasilineasis el cual ha sido sometido a una eliminación de grasas e impurezas.
Caucho sintético	Polímero Obtenido mediante reacciones químicas en algunos hidrocarburos utilizados para su fabricación.
Concreto asfáltico	Mezcla de agregados minerales y bitumen utilizados para conformar una carpeta de rodadura.
Contenido de asfalto	Porción de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades del diseño de mezcla trabajado.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa.
Elastómero	Polímeros muy elástico y viscoso formado por moléculas de carbono, hidrogeno, oxigeno o silicio.
Estabilidad	Capacidad con la que cuenta una mezcla asfáltica de resistir deformación al ser sometida a carga generada por el tráfico vehicular.
Fluencia	Deformación ocasionada en una probeta de asfalto bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Tamaño de las partículas de suelo en una muestra.

Gravedad específica	Propiedad que se obtiene de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de sustancia patrón.
Látex	Polímero natural que se extra de la sabia del árbol Hevea brasilienses.
MAC	Mezcla asfáltica en caliente. Es la unión de cemento asfáltico con áridos que cumple con una granulometría establecida en el diseño.
Polímero	Sustancia compuesta por moléculas formadas mediante enlaces covalentes de una o más unidades.
Polibutadieno	Caucho sintético o elastómero obtenido del proceso de polimerización de monómero ,3 butadieno.
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio de un material del que este hecha.
VA	Porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Cualidad del fluido mediante el cual proporciona resistencia al esfuerzo de carga.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un diseño de mezcla de Polibutadieno como aditivo modificador de resistencia con porcentajes de 2 %,4 % y 6 % para mezclas asfálticas.

Específicos

1. Determinar la compresión y flexión de la mezcla asfáltica con adición Polibutadieno.
2. Determinar la influencia del polibutadieno en las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica.
3. Determinar el porcentaje necesario polibutadieno para no perder las propiedades físico-químicas de la mezcla asfáltica.

INTRODUCCIÓN

En este análisis, se pretende evaluar el impacto de la incorporación de polibutadieno y caucho reciclado como aditivos modificadores en la resistencia de la mezcla asfáltica. La mezcla asfáltica es ampliamente utilizada en la construcción de carreteras y pavimentos debido a su durabilidad y capacidad para soportar cargas pesadas.

El polibutadieno es un caucho sintético que ha demostrado ser altamente versátil en diversas aplicaciones industriales. Su incorporación en la mezcla asfáltica puede mejorar las propiedades mecánicas, como la resistencia a la fatiga y al desgaste, lo que resulta en una mayor vida útil del pavimento. Además, el polibutadieno puede contribuir a reducir el ruido generado por el tráfico, ya que tiene propiedades de absorción acústica.

Por otro lado, el uso de caucho reciclado como aditivo modificador en la mezcla asfáltica es una forma efectiva de darle una segunda vida a los neumáticos desechados. El caucho reciclado mejora la elasticidad y flexibilidad de la mezcla asfáltica, lo que ayuda a reducir las grietas y fisuras causadas por el envejecimiento y las fluctuaciones de temperatura.

Al combinar el polibutadieno y el caucho reciclado en la mezcla asfáltica, se busca lograr un equilibrio óptimo entre las propiedades mecánicas mejoradas y el mantenimiento de las propiedades fisicoquímicas originales de la mezcla. Es importante tener en cuenta que la cantidad de polibutadieno y caucho reciclado agregados debe ser cuidadosamente controlada para evitar efectos negativos en la estabilidad y durabilidad del pavimento.

El uso de polibutadieno y caucho reciclado como aditivos modificadores en la mezcla asfáltica puede ofrecer beneficios significativos en términos de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Sin embargo, es necesario realizar estudios exhaustivos para determinar las proporciones adecuadas y evaluar el rendimiento a largo plazo de dichas mezclas modificadas.

1. MARCO TEÓRICO

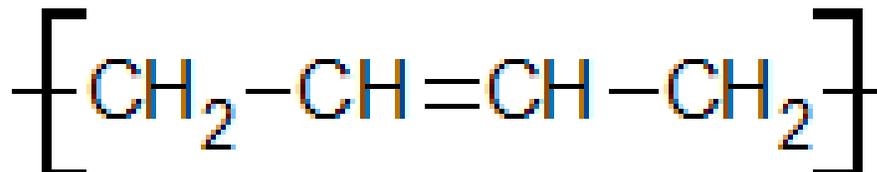
1.1. Polibutadieno

El polibutadieno es un caucho sintético que se usa ampliamente en varias aplicaciones industriales y de consumo debido a sus propiedades únicas. Posee alta elasticidad y resistencia a la abrasión, lo que lo convierte en un material ideal para la fabricación de productos que requieran alta durabilidad. El caucho de polibutadieno tiene buena resistencia al envejecimiento, reversión, abrasión y agrietamiento por flexión, así como buena flexibilidad a baja temperatura y alta resiliencia (Mexpolimeros, 2023).

Como resultado, se usa ampliamente en la producción de productos industriales y de consumo, incluidos neumáticos, pelotas de golf y objetos elásticos (Singh, 2015).

Figura 1.

Composición química del polibutadieno



Nota. Presentación de la composición química del Polibutadieno. Obtenido de *Textos Científicos* (s.f.). ABS. (<https://www.textoscintificos.com/polimeros/abs>), consultado el 17 de marzo 2022. De dominio público.

Una de las aplicaciones más importantes del polibutadieno es la fabricación de neumáticos. El polibutadieno se utiliza en la producción de neumáticos debido a su alta resistencia al desgaste, lo que lo hace ideal para su uso en bandas de rodamiento (Sahuquillo, 2023).

De hecho, la fabricación de neumáticos representa alrededor del 70 % de la producción de polibutadieno (Sahuquillo, 2023). Además, este tipo de caucho se utiliza en la fabricación de neumáticos industriales y para el aislamiento de vibraciones. Como caucho de uso general, el polibutadieno también se utiliza en la producción de calzado, accesorios deportivos y otras aplicaciones.

Figura 2.

Polibutadieno en neumáticos



Nota. Presentación del Polibutadieno en los neumáticos. Obtenido de *Textos Científicos (s.f.)*. ABS. (<https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>), consultado el 17 de marzo 2022. De dominio público.

El polibutadieno tiene varias aplicaciones industriales más allá de la producción de neumáticos. A menudo se utiliza como aditivo para mejorar las propiedades mecánicas del poliestireno y el ABS. Además, el polibutadieno se utiliza en la producción de poliuretano, un material que tiene excelentes propiedades físicas y alta resistencia a la abrasión. El 1,2-polibutadieno sindiotáctico es un material único que exhibe propiedades tanto del plástico como del caucho, lo que lo hace adecuado para diversas aplicaciones. En general, la

versatilidad y las propiedades únicas de este caucho sintético lo convierten en un material valioso en diversas aplicaciones industriales y de consumo.

1.1.1. Tipos de polibutadieno

Este caucho es un caucho sintético que se utiliza ampliamente en diversas industrias debido a sus propiedades únicas. Es un material muy versátil que se puede adaptar para cumplir con los requisitos de aplicaciones específicas. Hay diferentes tipos de polibutadieno disponibles, cada uno con sus propiedades y aplicaciones únicas. En este ensayo, exploraremos los tres tipos más comunes de polibutadieno: polibutadieno con alto contenido de cis, polibutadieno con alto contenido de trans y polibutadieno polimerizado con dieno.

El polibutadieno con alto contenido de cis es un tipo de polibutadieno que contiene un alto porcentaje de enlaces cis-1,4. Este tipo de polibutadieno es muy elástico y duradero, lo que lo hace ideal para su uso en la producción de neumáticos, cintas transportadoras y otros productos de caucho que requieren una alta resistencia al desgaste. El alto porcentaje de enlaces cis-1,4 en el polibutadieno con alto contenido de cis da como resultado una estructura molecular compacta que ofrece una excelente resistencia a la abrasión, el desgarro y la perforación. Además, el polibutadieno con alto contenido de cis exhibe un excelente rendimiento a bajas temperaturas, lo que lo hace ideal para su uso en climas fríos.

El polibutadieno con alto contenido de trans es un tipo de polibutadieno que contiene un alto porcentaje de enlaces trans-1,4. Este tipo de polibutadieno exhibe una temperatura de transición vítrea baja y una alta resistencia al calor, lo que lo hace ideal para su uso en la producción de adhesivos, selladores y revestimientos. El alto porcentaje de enlaces trans-1,4 en el polibutadieno con

alto contenido de trans da como resultado una estructura molecular más suelta que ofrece una excelente flexibilidad y rendimiento a bajas temperaturas. Además, el polibutadieno con alto contenido de trans exhibe una excelente resistencia a la oxidación, lo que lo hace ideal para su uso en aplicaciones de alta temperatura.

La polimerización de dieno es un método para polimerizar butadieno con otros monómeros de dieno para producir productos de polibutadieno únicos. Los polímeros resultantes tienen propiedades únicas, como dureza, elasticidad y resistencia mejoradas a los productos químicos. Ejemplos de polibutadienos polimerizados con dieno incluyen caucho de estireno-butadieno (SBR) y caucho de acrilonitrilo-butadieno (NBR). El SBR se utiliza comúnmente en la producción de bandas de rodadura de neumáticos, mientras que el NBR se utiliza en la producción de sellos, juntas y mangueras. Los polibutadienos polimerizados con dieno ofrecen una excelente resistencia al calor, los productos químicos y la abrasión, lo que los hace ideales para su uso en una amplia gama de aplicaciones.

El polibutadieno es un material muy versátil que puede adaptarse para cumplir con requisitos de aplicaciones específicas. Los tres tipos más comunes de polibutadieno son el polibutadieno con alto contenido de cis, el polibutadieno con alto contenido de trans y el polibutadieno polimerizado con dieno

1.1.1.1. Látex

El látex y el caucho son términos que a menudo se utilizan de manera intercambiable, pero es importante destacar que no son lo mismo. El látex se refiere a la savia lechosa que se obtiene del árbol del caucho, mientras que el caucho es un polímero elástico que puede encontrarse tanto en la savia natural

como en su forma sintética. El látex contiene una mezcla de polímeros de caucho natural, como el polisopreno, que le confieren sus propiedades elásticas. Por otro lado, el caucho puede ser producido artificialmente mediante diferentes procesos industriales.

Las propiedades y aplicaciones del látex y del caucho también difieren. El látex natural se obtiene de la savia del árbol del caucho y se utiliza en una variedad de aplicaciones, que incluyen:

- Guantes médicos y otros productos sanitarios
- Colchones y almohadas
- Ropa y accesorios
- Adhesivos y selladores
- Globos y otros productos inflables

El caucho, por otro lado, puede obtenerse de diversas plantas o fabricarse artificialmente. El caucho sintético puede tener una variedad de propiedades y aplicaciones debido a los polímeros fabricados artificialmente. El caucho se utiliza comúnmente en:

- Neumáticos y otros componentes de automoción
- Productos industriales, como mangueras y correas
- Calzado

- Aislamiento eléctrico
- Productos para el hogar, como guantes y artículos de limpieza.

Las diferencias entre el látex y el caucho se deben a su composición química y procesamiento. El látex es un polímero natural obtenido de la savia del árbol del caucho, mientras que el caucho puede ser natural o sintético. El látex natural es más suave, elástico y biodegradable, y se utiliza en productos que entran en contacto con el cuerpo humano debido a su naturaleza hipoalérgica. Por otro lado, el caucho es generalmente más duradero y resistente al desgaste que el látex.

Si bien el látex y el caucho comparten algunas similitudes, como su comportamiento elástico y su naturaleza impermeable, son materiales distintos con propiedades y aplicaciones únicas. Comprender las diferencias entre estos materiales puede ayudar a las personas a tomar decisiones informadas al seleccionar productos o materiales para diversas aplicaciones.

Figura 3.

Látex de caucho natural atrapado del árbol Hevea brasilienses



Nota. J. Navarro (2018). *Definición de latex* [Fotografía]. D.ABC. (<https://www.definicionabc.com/general/latex.php>). Derechos de autor 2018 por Fotolia – Kokhanchikov.

1.1.1.2. Caucho natural

El caucho natural es un material versátil y duradero que ha sido utilizado en diversas industrias durante siglos. Es conocido por su alta elasticidad y resistencia, lo que lo convierte en una opción ideal para productos que requieren flexibilidad y durabilidad. Además, el caucho natural tiene excelentes propiedades de aislamiento contra la electricidad y el calor, lo que lo hace muy útil en aplicaciones de aislamiento eléctrico.

Una de las características destacadas del caucho natural es su resistencia al agua, productos químicos y abrasión. Esto lo convierte en un material confiable para una amplia gama de aplicaciones. Por ejemplo, en la industria minera y pesada, el caucho natural se utiliza en la producción de cintas transportadoras que deben soportar condiciones difíciles y un desgaste constante.

El proceso de producción del caucho natural comienza con la extracción del látex de los árboles de caucho. El látex es un líquido lechoso que se obtiene al hacer incisiones en la corteza del árbol. Luego, el látex se coagula mediante diversos métodos para formar caucho sólido, el cual se procesa en diferentes formas como láminas, bloques y gránulos. Durante el procesamiento, se llevan a cabo pasos como lavado, secado y molienda para eliminar impurezas y mejorar la calidad del caucho.

El caucho natural encuentra aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la automotriz, construcción y atención sanitaria. En la fabricación de neumáticos para vehículos automotores, bicicletas y aviones, el caucho natural ofrece un agarre excepcional y una gran durabilidad. También se utiliza en la producción de guantes, globos y otros productos de caucho, donde proporciona flexibilidad y protección. En la industria de la construcción, el caucho natural se utiliza para sellado, adhesión y aislamiento debido a su resistencia al agua y productos químicos.

En resumen, el caucho natural es un material versátil y sostenible que ofrece propiedades únicas y beneficios en diversas aplicaciones industriales. Su elasticidad, resistencia y resistencia a los elementos lo convierten en una opción preferida en comparación con los materiales sintéticos. Además, su proceso de producción renovable lo convierte en una alternativa ecológica para las necesidades actuales y futuras

Figura 4.

Secado de amina de caucho natural



Nota. E. Méndez (2020). *México con gran potencial para cultivar hule natural para insumos contra Covid-19* [Fotografía]. EXCELSIOR. (<https://www.excelsior.com.mx/nacional/mexico-con-gran-potencial-para-cultivar-hule-natural-para-insumos-contra-covid-19/1422601>). Derechos de autor 2023 por EXCELSIOR.

1.1.1.3. Caucho sintético

El caucho sintético se ha convertido en una parte integral de nuestra vida diaria, desde los neumáticos de nuestros automóviles hasta las suelas de nuestros zapatos. ¿Pero dónde empezó todo? En este ensayo, exploraremos la historia y el desarrollo del caucho sintético, los diferentes tipos de caucho sintético y sus diversas aplicaciones.

El desarrollo del caucho sintético fue impulsado por la necesidad de una alternativa confiable y rentable al caucho natural durante la Segunda Guerra Mundial. Antes de esto, el caucho natural se obtenía principalmente de árboles de caucho del sudeste asiático, lo que lo hacía vulnerable a interrupciones en la cadena de suministro. El descubrimiento del caucho sintético por parte de los químicos a principios del siglo XX allanó el camino para avances tecnológicos que permitieron la producción en masa de caucho sintético. De hecho, al final de la guerra, la producción de caucho sintético había superado a la del caucho natural.

Existen varios tipos de caucho sintético, cada uno con sus propias propiedades y aplicaciones únicas. El caucho de estireno-butadieno (SBR) es el caucho sintético más utilizado y se encuentra comúnmente en neumáticos, ya que proporciona buena resistencia a la abrasión y alta tracción. El caucho de polibutadieno (BR) se utiliza en la producción de pelotas de golf y adhesivos debido a su alta elasticidad. El caucho de neopreno, conocido por su resistencia al aceite, el calor y la intemperie, se utiliza en mangueras y correas industriales.

Las aplicaciones del caucho sintético son amplias y variadas. Los neumáticos para automóviles, camiones y aviones son el uso más importante del caucho sintético; más del 70 % de todo el caucho sintético producido se utiliza en la producción de neumáticos. Las mangueras y correas industriales también dependen en gran medida del caucho sintético debido a su durabilidad y resistencia a entornos hostiles. El caucho sintético también se utiliza habitualmente en la producción de suelas de zapatos y otro tipo de calzado, proporcionando amortiguación y apoyo al usuario.

El caucho sintético ha revolucionado la industria del caucho y se ha convertido en un material esencial en la fabricación moderna. Su desarrollo

durante la Segunda Guerra Mundial ha propiciado avances tecnológicos que han permitido la producción masiva de caucho sintético, que ha superado a la del caucho natural. Con sus propiedades y aplicaciones únicas, el caucho sintético se ha convertido en un material indispensable en muchas industrias, desde la automoción hasta el calzado.

Figura 5.

Planchas de caucho sintético



Nota. Presentación del caucho sintético. Obtenido de Trigosa (2022). *Características de las planchas de caucho.* (<https://trigosa.com/productos/plancha-caucho/planchas-de-caucho/>), consultado el 8 de agosto de 2023. De dominio público.

1.1.1.4. SBR

El SBR derivado del caucho es un elastómero sintético que se ha vuelto cada vez más popular en la industria manufacturera. Este ensayo explorará las propiedades, el proceso de producción y las aplicaciones de SBR derivados del caucho.

SBR es un elastómero sintético elaborado a partir de monómeros de estireno y butadieno. Tiene una excelente resistencia a la abrasión, durabilidad y flexibilidad a bajas temperaturas. El SBR se utiliza ampliamente en la fabricación de neumáticos, cintas transportadoras, calzado y otros productos industriales. Además, SBR es resistente al agua, a los productos químicos y a la radiación UV. Las propiedades únicas del SBR lo convierten en un material ideal para su uso en entornos hostiles donde otros materiales pueden fallar. Por ejemplo, el SBR se utiliza en la producción de sellos y juntas en la industria automotriz, donde debe soportar altas temperaturas y presiones.

La producción de SBR implica la polimerización de estireno y butadieno en presencia de un catalizador y otros aditivos. Luego, el polímero resultante se purifica, se seca y se procesa en diversas formas, como gránulos, láminas o soluciones líquidas. El proceso de producción se puede modificar para producir SBR con diferentes propiedades, como grados de alta resistencia o grados de baja temperatura. Por ejemplo, el SBR utilizado en la producción de neumáticos suele ser de alta resistencia y excelente resistencia al desgaste.

El SBR se utiliza principalmente en la fabricación de neumáticos, donde proporciona excelente tracción, resistencia al desgaste y eficiencia de combustible. El SBR también se utiliza en la producción de cintas transportadoras, juntas, sellos, mangueras y otros productos industriales. El SBR

se puede mezclar con otros elastómeros o rellenos para mejorar sus propiedades, como la resistencia al aceite o la intemperie. Por ejemplo, el SBR se puede mezclar con caucho natural para crear un material con mejor resistencia a la intemperie y al ozono. El SBR también se utiliza en la producción de calzado, donde proporciona un excelente agarre y durabilidad.

El SBR derivado del caucho es un material versátil que tiene una amplia gama de aplicaciones en la industria manufacturera. Sus propiedades únicas lo convierten en un material ideal para su uso en entornos hostiles y su proceso de producción puede modificarse para producir SBR con diferentes propiedades. A medida que la tecnología continúa avanzando, es probable que SBR se vuelva aún más popular en la industria manufacturera.

Figura 6.

Caucho sintético SBR



Nota. Presentación del caucho sintético. Obtenido de Química Miralles (2023). *Caucho sintético.* (<https://www.quimicamiralles.cl/index.php/productos/cauchos/cauchos-sinteticos-1/estireno-butadieno/caucho-sbr-arpol-1712>), consultado el 19 de julio de 2023. De dominio público.

1.1.1.5. SBS

El SBS derivado del caucho, o estireno-butadieno-estireno, es un material versátil y duradero que tiene una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias. Este ensayo explorará en detalle las propiedades, el proceso de producción y las aplicaciones del SBS derivado del caucho.

El SBS derivado del caucho tiene una combinación única de propiedades físicas, químicas y mecánicas que lo convierten en un material ideal para diversas aplicaciones. Sus propiedades físicas incluyen elasticidad, flexibilidad y durabilidad, que le permiten soportar tensiones y deformaciones repetidas sin perder su forma o función. Sus propiedades químicas incluyen resistencia al calor, al agua y a los productos químicos, lo que lo hace adecuado para su uso en entornos hostiles. Sus propiedades mecánicas incluyen resistencia a la tracción, resistencia al desgarro y resistencia al impacto, lo que lo convierte en un material confiable y duradero.

Por ejemplo, el SBS derivado del caucho se usa comúnmente en la fabricación de adhesivos, selladores y recubrimientos debido a sus excelentes propiedades de unión y resistencia al agua y a los productos químicos; también se utiliza en la producción de modificadores de asfalto para la construcción de carreteras, donde su alta elasticidad y durabilidad ayudan a mejorar el rendimiento y la longevidad del asfalto; además, el SBS derivado del caucho se utiliza en la formulación de elastómeros termoplásticos para automóviles y bienes de consumo, donde su flexibilidad y dureza lo convierten en un material ideal para piezas que requieren resistencia y flexibilidad.

El proceso de producción de SBS derivado del caucho consta de varios pasos, comenzando con la extracción del caucho a partir de materias primas como el látex o los neumáticos de desecho. Luego, el caucho se polimeriza con estireno y butadieno para formar SBS, que es un elastómero termoplástico. Luego, el caucho y el SBS se mezclan en proporciones específicas para lograr las propiedades y características deseadas.

Por ejemplo, la producción de SBS derivado del caucho a partir de neumáticos de desecho no sólo proporciona una solución sostenible para la

gestión de residuos, sino que también reduce la dependencia de materiales derivados del petróleo. Además, el uso de caucho reciclado en la producción de SBS puede mejorar las propiedades del producto final, como aumentar su elasticidad y durabilidad.

El SBS derivado del caucho tiene una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias debido a sus propiedades y características únicas. Una aplicación importante del SBS derivado del caucho es la fabricación de adhesivos, selladores y revestimientos. Las excelentes propiedades de unión y la resistencia al agua y a los productos químicos del material lo hacen ideal para su uso en aplicaciones industriales y de construcción.

Otra aplicación del SBS derivado del caucho es la producción de modificadores de asfalto para la construcción de carreteras. La alta elasticidad y durabilidad del material ayudan a mejorar el rendimiento y la longevidad del asfalto, lo que lo convierte en una solución confiable y rentable para el mantenimiento y la construcción de carreteras.

Finalmente, el SBS derivado del caucho también se utiliza en la formulación de elastómeros termoplásticos para automóviles y bienes de consumo. La flexibilidad y dureza del material lo convierten en un material ideal para piezas que requieren resistencia y flexibilidad, como parachoques, molduras de puertas y manijas de automóviles.

El SBS derivado del caucho es un material versátil y duradero que tiene una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias.

Figura 7.

Lamina de caucho SBS



Nota. Láminas de caucho sintético. Obtenido de Gardencenterejea (2023). *¿Qué es el tejido SBS?*. (<https://gardencenterejea.com/accesorios-casetas-de-madera/8376-sbs-caucho-sintetico.html>), consultado el 19 de julio de 2023. De dominio público.

1.1.2. Procesos de producción polibutadieno

El polibutadieno es un caucho sintético que se utiliza ampliamente en la fabricación de diversos productos como neumáticos, mangueras, correas y adhesivos. La producción de polibutadieno implica diferentes procesos, cada uno con sus propias ventajas y desventajas. Este ensayo tiene como objetivo proporcionar una descripción detallada de los tres procesos principales de

producción de polibutadieno: polimerización en solución, polimerización en emulsión y polimerización en suspensión.

El proceso de polimerización en solución implica disolver el monómero de butadieno en un disolvente como hexano o ciclohexano y luego agregar un catalizador para iniciar la reacción de polimerización. La reacción tiene lugar en un recipiente reactor equipado con un sistema de enfriamiento para mantener una temperatura constante. La solución de polibutadieno resultante se purifica y se seca para eliminar cualquier disolvente residual. Una de las ventajas del proceso de polimerización en solución es que produce polibutadieno de alta calidad con propiedades consistentes. Sin embargo, el proceso es caro debido al alto coste de los disolventes y catalizadores.

Además, el proceso es muy sensible a las impurezas, que pueden afectar la calidad del producto final. Los factores que pueden afectar el proceso incluyen la temperatura, la presión y la concentración del catalizador.

El proceso de polimerización en emulsión implica dispersar monómero de butadieno en una solución acuosa que contiene tensioactivos y otros aditivos. Luego se agrega un catalizador para iniciar la reacción de polimerización. La reacción tiene lugar en un recipiente reactor equipado con un sistema de enfriamiento para mantener una temperatura constante.

A continuación, la emulsión de polibutadieno resultante se purifica y se seca para eliminar el agua residual. Una de las ventajas del proceso de polimerización en emulsión es que es rentable y produce grandes cantidades de polibutadieno. Sin embargo, el proceso es muy sensible a las impurezas y puede producir polibutadieno con propiedades inconsistentes. Los factores que pueden

afectar el proceso incluyen la temperatura, el pH, la concentración de surfactante y la velocidad de agitación.

El proceso de polimerización en suspensión implica suspender gotitas de monómero de butadieno en una solución acuosa que contiene un estabilizador y un catalizador. La reacción tiene lugar en un recipiente reactor equipado con un sistema de enfriamiento para mantener una temperatura constante.

A continuación, las partículas de polibutadieno resultantes se purifican y se secan para eliminar el agua residual. Una de las ventajas del proceso de polimerización en suspensión es que produce polibutadieno con buenas propiedades físicas y alta pureza.

Sin embargo, el proceso lleva mucho tiempo y requiere una gran cantidad de energía para mantener la suspensión. Los factores que pueden afectar el proceso incluyen la temperatura, la velocidad de agitación, la concentración de estabilizador y la concentración de catalizador.

La producción de polibutadieno implica tres procesos principales: polimerización en solución, polimerización en emulsión y polimerización en suspensión. Cada proceso tiene sus propias ventajas y desventajas, y factores como la temperatura, la presión, el pH y la concentración del catalizador pueden afectar la calidad del producto final. Los fabricantes deben considerar cuidadosamente estos factores al seleccionar un proceso de producción de polibutadieno para garantizar que el producto resultante cumpla con las especificaciones deseadas.

1.1.3. Características del polibutadieno

El polibutadieno es un polímero sintético que ha ganado inmensa popularidad en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades únicas. Este polímero flexible está formado por unidades repetidas de 1,3-butadieno y su estructura molecular juega un papel crucial en la determinación de sus propiedades físicas. En este ensayo, exploraremos en detalle la estructura molecular, las propiedades físicas y las aplicaciones del polibutadieno.

La estructura molecular del polibutadieno es altamente insaturada, lo que le confiere un alto grado de flexibilidad. Las cadenas de polímeros pueden existir en una configuración cis o trans, lo que afecta sus propiedades físicas. La configuración cis da como resultado una estructura más rígida, mientras que la configuración trans conduce a una estructura más flexible. Esta flexibilidad estructural convierte al polibutadieno en un polímero ideal para diversas aplicaciones industriales. Por ejemplo, el polibutadieno se utiliza en la producción de adhesivos, selladores y revestimientos debido a su alto grado de flexibilidad.

El polibutadieno tiene propiedades físicas únicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones industriales. Tiene una temperatura de transición vítrea baja, lo que lo hace flexible a bajas temperaturas. Esta propiedad lo hace ideal para su uso en la producción de neumáticos, donde la flexibilidad a bajas temperaturas es esencial. Además, el polibutadieno tiene una alta resiliencia y resistencia al desgaste, lo que lo hace adecuado para la fabricación de neumáticos. Sin embargo, tiene una baja resistencia a la tracción y al desgarro, lo que limita su uso en determinadas aplicaciones.

El polibutadieno se utiliza principalmente en la fabricación de neumáticos debido a su alta resiliencia y baja resistencia a la rodadura. También se utiliza en

la producción de cintas transportadoras, suelas de zapatos y otros productos de caucho. El polibutadieno se puede modificar para mejorar sus propiedades para aplicaciones específicas. Por ejemplo, agregar cargas como negro de humo o sílice puede aumentar su resistencia y durabilidad. Además, el polibutadieno se puede mezclar con otros polímeros para crear nuevos materiales con propiedades mejoradas.

El polibutadieno es un polímero flexible que tiene propiedades únicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones industriales. Su estructura molecular, propiedades físicas y aplicaciones se han analizado en detalle en este ensayo. La flexibilidad, la resiliencia y la baja resistencia a la rodadura del polibutadieno lo hacen ideal para la fabricación de neumáticos, mientras que su baja temperatura de transición vítrea lo hace adecuado para su uso en temperaturas frías. Con más investigación y desarrollo, las propiedades del polibutadieno se pueden mejorar para crear nuevos materiales que satisfagan las necesidades de diversas industrias.

1.1.3.1. Consistencia

El polibutadieno es un polímero sintético que se utiliza ampliamente en la producción de diversos productos, incluidos neumáticos, adhesivos y revestimientos. Sus propiedades únicas, como su alta elasticidad y baja temperatura de transición vítrea, lo convierten en un material versátil en muchas industrias. Sin embargo, la consistencia del polibutadieno puede variar dependiendo de varios factores, que pueden afectar su rendimiento y calidad. En este ensayo, exploraremos la definición y las propiedades del polibutadieno, los factores que afectan su consistencia y los métodos para medirlo y controlarlo.

El polibutadieno es un polímero compuesto de unidades repetidas de monómeros de butadieno. La estructura del polibutadieno puede variar según el tipo de proceso de polimerización utilizado. La distribución del peso molecular del polibutadieno también puede afectar sus propiedades, incluida su consistencia. Hay tres tipos principales de polibutadieno: alto en cis, alto en trans y alto en vinilo. El polibutadieno cis alto tiene una alta proporción de dobles enlaces cis, lo que da como resultado una estructura más rígida y cristalina.

El polibutadieno alto en trans tiene una alta proporción de dobles enlaces trans, lo que da como resultado una estructura más flexible y amorfa. El polibutadieno con alto contenido de vinilo tiene una alta proporción de grupos vinilo, lo que da como resultado una estructura más reactiva y reticulable. Las propiedades físicas y químicas del polibutadieno, incluidas su consistencia, viscosidad y elasticidad, también se ven influenciadas por su distribución de peso molecular y ramificación.

Varios factores pueden afectar la consistencia del polibutadieno. Las condiciones de polimerización, como la temperatura, la presión y el tipo de catalizador, pueden tener un impacto significativo en la distribución del peso molecular y la estructura del polibutadieno. Por ejemplo, una temperatura y presión más altas pueden dar como resultado un mayor grado de polimerización y una estructura más ramificada, lo que puede afectar su consistencia. La pureza y calidad del monómero de butadieno utilizado en el proceso de polimerización también pueden afectar la consistencia del polibutadieno.

Las impurezas en el monómero pueden provocar defectos en la estructura del polímero, lo que puede afectar sus propiedades. La distribución del peso molecular y la ramificación del polibutadieno también pueden afectar su

consistencia, ya que un peso molecular más alto y una mayor ramificación dan como resultado un material más viscoso y elástico.

Existen varios métodos para medir y controlar la consistencia del polibutadieno. Las mediciones de reología y viscoelasticidad pueden proporcionar información sobre el comportamiento de flujo y deformación del polibutadieno, que puede usarse para determinar su consistencia. Las técnicas espectroscópicas, como RMN, IR y Raman, pueden proporcionar información sobre la estructura química y la composición del polibutadieno, que puede usarse para determinar su distribución de peso molecular y ramificación.

La cromatografía de permeación en gel (GPC) es una técnica comúnmente utilizada para medir la distribución del peso molecular del polibutadieno. Al controlar las condiciones de polimerización y monitorear la consistencia del polibutadieno utilizando estos métodos, los fabricantes pueden garantizar que sus productos cumplan con las especificaciones y requisitos de rendimiento deseados.

1.1.3.2. La exudación

La exudación de polibutadieno es un fenómeno por el cual el polímero migra a la superficie del material y forma una película delgada o gotas. Esto puede ocurrir debido a una variedad de factores, como la composición química de la matriz polimérica, las condiciones de procesamiento y factores ambientales como la humedad y la exposición a la radiación UV. Estudios anteriores han demostrado que el peso molecular, la ramificación y la reticulación del polibutadieno pueden afectar su comportamiento de exudación. Además, la presencia de otros polímeros o aditivos en la formulación también puede afectar el grado de exudación.

Los factores que afectan la exudación de polibutadieno se pueden clasificar ampliamente en tres categorías: composición química, condiciones de procesamiento y factores ambientales. La composición química de la matriz polimérica juega un papel crucial en la determinación del comportamiento de exudación del polibutadieno. Por ejemplo, la adición de polímeros polares o de alto peso molecular puede reducir la exudación de polibutadieno al aumentar la compatibilidad entre los dos polímeros.

Las condiciones de procesamiento como la temperatura, la presión y el tiempo de mezcla también pueden influir en el grado de exudación. Las temperaturas de procesamiento más altas y los tiempos de mezcla más prolongados pueden aumentar la movilidad de las moléculas de polibutadieno, lo que provoca una mayor exudación. Finalmente, factores ambientales como la humedad y la radiación UV también pueden afectar el comportamiento de exudación del polibutadieno.

La prevención y reducción de la exudación de polibutadieno se puede lograr mediante una variedad de métodos, como la modificación de la matriz polimérica, la optimización de las condiciones de procesamiento y técnicas de modificación de la superficie. La modificación de la matriz polimérica mediante la adición de compatibilizadores o cargas puede mejorar la adhesión entre el polibutadieno y otros materiales, reduciendo así la exudación.

La optimización de las condiciones de procesamiento, como la temperatura, la presión y el tiempo de mezcla, también puede minimizar la exudación. Finalmente, las técnicas de modificación de la superficie, como el tratamiento con plasma o el recubrimiento con un material de baja energía superficial, pueden reducir la adhesión del polibutadieno a otros materiales, lo que lleva a una menor exudación.

1.1.3.3. Segregación

La composición química del compuesto de caucho es un factor crítico que puede afectar la aparición de segregación de polibutadieno. El polibutadieno a menudo se mezcla con otros materiales, como rellenos y coadyuvantes de procesamiento, para mejorar sus propiedades. Sin embargo, la compatibilidad de estos materiales con el polibutadieno puede variar, lo que lleva a la separación y segregación de fases durante el procesamiento. Las condiciones de procesamiento como la temperatura, la presión y el tiempo de mezcla también pueden contribuir a la segregación del polibutadieno.

Por ejemplo, las altas temperaturas pueden hacer que el compuesto de caucho se ablande y fluya, lo que lleva a la separación de la fase de polibutadieno. De manera similar, un tiempo de mezclado inadecuado o una presión baja pueden dar como resultado una dispersión incompleta de la fase de polibutadieno, lo que lleva a la segregación. La presencia de contaminantes o impurezas en las materias primas también puede contribuir a la segregación del polibutadieno. Por ejemplo, la presencia de agua u otras sustancias polares puede interferir con la unión entre el polibutadieno y otros materiales del compuesto, lo que lleva a la separación de fases.

La segregación de polibutadieno puede tener efectos significativos sobre las propiedades mecánicas del producto final. La segregación puede dar como resultado una distribución no uniforme de la fase de polibutadieno, lo que lleva a una reducción de la resistencia a la tracción y el alargamiento. Esto puede comprometer la durabilidad y la vida útil del producto, haciéndolo más susceptible al desgaste. Además, la segregación del polibutadieno puede aumentar el riesgo de defectos y fallas en el producto final. Por ejemplo, la segregación puede dar

lugar a la formación de huecos o puntos débiles en el material, haciéndolo más propenso a agrietarse o romperse bajo tensión.

Para prevenir y mitigar la segregación de polibutadieno, es esencial optimizar los parámetros de procesamiento para minimizar la segregación. Por ejemplo, ajustar la temperatura, la presión y el tiempo de mezcla puede ayudar a garantizar que la fase de polibutadieno esté uniformemente dispersa en todo el compuesto.

El uso de materias primas de alta calidad con bajos niveles de impurezas también puede ayudar a prevenir la segregación. También puede resultar beneficioso implementar medidas de control de calidad para detectar y corregir problemas de segregación en las primeras etapas del proceso de producción.

Por ejemplo, las pruebas periódicas del compuesto de caucho para determinar su segregación pueden ayudar a identificar y abordar cualquier problema antes de que afecte la calidad del producto final.

1.1.3.4. Resistencia

La alta resistencia a la tracción del polibutadieno lo hace resistente a la deformación y al desgarro bajo tensión. Esta propiedad es particularmente importante en aplicaciones donde el material está sujeto a tensiones o impactos repetidos, como en la fabricación de neumáticos. Además, la excelente resistencia química del polibutadieno lo hace resistente a la degradación por exposición a una amplia gama de químicos, incluidos aceites, solventes y ácidos. Finalmente, la baja temperatura de transición vítrea del polibutadieno lo hace resistente al agrietamiento y a la fragilidad a bajas temperaturas, lo que lo hace ideal para su uso en ambientes fríos.

La temperatura y las condiciones ambientales pueden afectar las propiedades de resistencia del polibutadieno. La exposición a altas temperaturas puede hacer que el material se degrade y pierda sus propiedades de resistencia, mientras que la exposición a bajas temperaturas puede hacer que el material se vuelva quebradizo y se agriete. Además, la presencia de otros químicos o contaminantes puede afectar las propiedades de resistencia del polibutadieno, ya que algunos químicos pueden reaccionar con el material y provocar que se degrade. Finalmente, el grado de reticulación en el polímero de polibutadieno puede afectar sus propiedades de resistencia, y niveles más altos de reticulación generalmente dan como resultado una mayor resistencia.

El polibutadieno se utiliza comúnmente en los sectores automotriz e industrial, donde sus propiedades de resistencia lo hacen ideal para su uso en neumáticos, mangueras, sellos y empaquetaduras. Para medir las propiedades de resistencia del polibutadieno se utilizan pruebas estandarizadas, como la prueba ASTM D471 de resistencia a líquidos. Los avances en los métodos y materiales de prueba han llevado al desarrollo de nuevos métodos de prueba, como el uso de microscopía de fuerza atómica para medir las propiedades superficiales del polibutadieno. Estos avances han ayudado a mejorar nuestra comprensión de la resistencia del polibutadieno y a desarrollar nuevos materiales con propiedades de resistencia aún mayores.

Las propiedades de resistencia del polibutadieno lo convierten en un material valioso en muchas aplicaciones. Su alta resistencia a la tracción, excelente resistencia química y baja temperatura de transición vítrea contribuyen a sus propiedades de resistencia, mientras que la temperatura y las condiciones ambientales, la presencia de otros químicos o contaminantes y el grado de reticulación en el polímero de polibutadieno pueden afectar su resistencia. Las pruebas estandarizadas y los avances en los métodos y materiales de prueba

han ayudado a mejorar nuestra comprensión de la resistencia del polibutadieno y a desarrollar nuevos materiales con propiedades de resistencia aún mayores.

1.1.3.5. Densidad

La densidad del polibutadieno está influenciada por varios factores, como el peso molecular, las condiciones de polimerización y el tipo y concentración del catalizador. El peso molecular y la distribución del polibutadieno pueden afectar significativamente su densidad. El polibutadieno de alto peso molecular tiende a tener una densidad mayor que el polibutadieno de bajo peso molecular.

Las condiciones de polimerización, como la temperatura y la presión, también pueden afectar la densidad del polibutadieno. Temperaturas y presiones de polimerización más altas pueden dar como resultado densidades de polibutadieno más altas. El tipo y la concentración de catalizadores utilizados en el proceso de polimerización también pueden afectar la densidad del polibutadieno. Por ejemplo, se sabe que los catalizadores Ziegler-Natta producen polibutadieno con densidades más altas que otros catalizadores.

El polibutadieno con diferentes densidades se puede utilizar en diversas aplicaciones industriales. El polibutadieno de alta densidad (HD-PB) con una densidad de alrededor de $0,93 \text{ g/cm}^3$ se utiliza habitualmente en la fabricación de neumáticos debido a su excelente resistencia al desgaste y baja resistencia a la rodadura. El polibutadieno de baja densidad (LD-PB), con una densidad de aproximadamente $0,91 \text{ g/cm}^3$, se utiliza en adhesivos y selladores debido a sus excelentes propiedades adhesivas. El polibutadieno de densidad media (MD-PB) con una densidad de alrededor de $0,92 \text{ g/cm}^3$ se utiliza en productos de caucho industriales como mangueras, correas y juntas debido a sus excelentes propiedades mecánicas.

En conclusión, la densidad del polibutadieno es un factor importante que puede afectar significativamente su desempeño en diversas aplicaciones industriales. La densidad del polibutadieno está influenciada por varios factores, como el peso molecular, las condiciones de polimerización y el tipo y concentración del catalizador. Comprender estos factores puede ayudar a los fabricantes a producir polibutadieno con la densidad deseada para aplicaciones específicas.

Al utilizar polibutadieno con diferentes densidades, los fabricantes pueden crear productos con diferentes propiedades mecánicas y adhesivas, lo que lo convierte en un material versátil para diversas aplicaciones industriales.

1.1.3.6. Durabilidad

La durabilidad del polibutadieno está determinada en gran medida por su composición química y estructura molecular. El polibutadieno es un polímero formado por unidades repetidas de monómeros de butadieno, que pueden sintetizarse de diferentes maneras para producir polímeros con diferentes propiedades. Las propiedades mecánicas del polibutadieno, como la resistencia a la tracción y la dureza, son factores importantes para determinar su durabilidad. Además, factores ambientales como la temperatura y la humedad pueden afectar significativamente el rendimiento del polibutadieno.

Las altas temperaturas pueden provocar la degradación del polibutadieno, lo que provoca una reducción de sus propiedades mecánicas y un aumento de su fragilidad. La humedad también puede causar problemas, ya que puede provocar la formación de gotas de agua en la superficie del polibutadieno, lo que puede hacer que se degrade con el tiempo.

La degradación del polibutadieno puede ocurrir mediante una variedad de mecanismos. La oxidación y la fotooxidación son causas comunes de la degradación del polibutadieno, que ocurre cuando las moléculas de oxígeno reaccionan con las cadenas del polímero, lo que lleva a la formación de radicales libres. Estos radicales libres pueden luego reaccionar con otras cadenas poliméricas, provocando reticulación y degradación. La degradación térmica es otro mecanismo común de degradación del polibutadieno, que ocurre cuando el polímero se expone a altas temperaturas durante períodos prolongados.

Las tensiones mecánicas y la fatiga también pueden hacer que el polibutadieno se degrade, ya que las cargas mecánicas repetidas pueden provocar que las cadenas de polímero se rompan con el tiempo.

Existen varias estrategias que se pueden emplear para mejorar la durabilidad del polibutadieno. Un enfoque consiste en formular polibutadieno con aditivos que puedan mejorar sus propiedades, como antioxidantes o estabilizadores UV. Otro enfoque consiste en modificar la estructura molecular del polibutadieno para mejorar su resistencia a la degradación. Esto se puede lograr mediante el uso de agentes reticulantes o introduciendo grupos químicos que puedan reaccionar con los radicales libres, evitando que causen una mayor degradación.

Finalmente, se pueden aplicar recubrimientos o películas protectoras para reducir la exposición a factores ambientales, como la radiación UV o la humedad, que pueden hacer que el polibutadieno se degrade con el tiempo.

Para mejorar la durabilidad del polibutadieno, se pueden emplear varias estrategias, incluido el uso de aditivos, modificación de la estructura molecular y recubrimientos protectores. Al comprender los factores que afectan la durabilidad

del polibutadieno y emplear estas estrategias, podemos garantizar que este importante polímero continúe desempeñando un papel vital en la industria moderna.

1.2. Asfaltos

Es un material omnipresente que se utiliza ampliamente en las industrias de la construcción y la fabricación. Es una forma semisólida de petróleo que tiene una variedad de características físicas y aplicaciones. El asfalto es una forma negra y semisólida de petróleo que se encuentra comúnmente en depósitos naturales o se extrae del petróleo crudo.

Tiene un olor distintivo y una textura suave y brillante cuando se calienta. El asfalto es una sustancia muy viscosa que se vuelve más fluida a temperaturas más altas. Esta propiedad permite que se mezcle fácilmente con otros materiales y se aplique a superficies. El asfalto también es un buen conductor del calor, lo que lo convierte en un material ideal para la construcción de carreteras en climas fríos. Además, es resistente al agua y puede usarse en aplicaciones subacuáticas se utiliza comúnmente en la construcción y mantenimiento de carreteras.

Como también se utiliza como aglutinante en la producción de hormigón asfáltico, que se utiliza para pavimentar carreteras y autopistas cabe mencionar que se utiliza para impermeabilizar cubiertas y cimientos de edificios. A menudo se utiliza como revestimiento o adhesivo en la fabricación de diversos productos, como tejas, baldosas y revestimientos de tuberías. Además, el asfalto se utiliza en la producción de selladores y adhesivos utilizados en proyectos de construcción.

También es resistente a la intemperie y la erosión, lo que lo convierte en una buena opción para aplicaciones en exteriores. Sin embargo, el asfalto también tiene algunas desventajas. Por ejemplo, cuando se calienta puede liberar gases nocivos que pueden ser peligrosos para la salud humana y el medio ambiente. Además, su producción y transporte pueden ser costosos, lo que puede aumentar el costo de los proyectos de construcción.

Figura 8.

Colocación de asfalto en carpeta de rodadura



Nota. R. Roberts (2017). *Analizando la integridad del asfalto* [Fotografía]. Carreteras Pan-Americanas. (<https://www.carreteras-pa.com/reportajes/analizando-la-integridad-del-asfalto/>). Derechos de autor 2017 por Carreteras Pan-Americanas.

1.2.1. Peso específico del asfalto

El asfalto es una mezcla de agregados (como arena, grava y piedra triturada) y betún, que es un material viscoso, negro y pegajoso derivado del petróleo. Las propiedades físicas del asfalto varían dependiendo del tipo de áridos y betún utilizados, así como del proceso de producción. Generalmente, el asfalto tiene un peso específico que oscila entre 2 y 2,5 gramos por centímetro cúbico, inferior al de la mayoría de materiales de construcción.

La viscosidad del asfalto varía desde muy viscosa a temperatura ambiente hasta fluida a altas temperaturas, y su dureza varía de blanda a dura dependiendo de la cantidad de betún y áridos. Existen diferentes tipos de asfalto, incluida la mezcla en caliente, la mezcla tibia y la mezcla en frío, que se diferencian en su temperatura de producción y viscosidad.

El peso específico del asfalto está influenciado por varios factores, incluyendo la gradación y densidad del agregado, la viscosidad y temperatura del betún, y el contenido de huecos de aire y el nivel de compactación. El tamaño y la densidad de los agregados utilizados en la producción de asfalto afectan su peso específico, siendo los agregados más grandes y densos los que dan como resultado un peso específico más alto.

La viscosidad y la temperatura del betún también afectan el peso específico del asfalto, donde una mayor viscosidad y una temperatura más baja dan como resultado un peso específico más alto. El contenido de huecos de aire y el nivel de compactación del asfalto también afectan su peso específico, con un mayor contenido de huecos de aire y un menor nivel de compactación dando como resultado un peso específico más bajo.

Existen varios métodos para determinar el peso específico del asfalto, incluido el uso de un medidor nuclear o un picnómetro para medir la densidad del asfalto, o calcular el peso específico en función del peso y volumen de la muestra de asfalto. El método del medidor nuclear implica el uso de un dispositivo que emite radiación y mide la cantidad de radiación que penetra en la muestra de asfalto, que luego se utiliza para calcular su densidad y peso específico.

El método del picnómetro implica llenar un recipiente con un volumen conocido de asfalto y pesarlo, luego calcular el peso específico en función del peso y volumen de la muestra. Las mediciones precisas del peso específico del asfalto son importantes para el diseño y la construcción de pavimentos, ya que ayudan a garantizar el espesor y la resistencia adecuados del pavimento.

1.3. Ensayos

Para garantizar que el asfalto cumple con los estándares requeridos, debe someterse a diversas pruebas. En este ensayo, discutiremos tres pruebas que se usan comúnmente para evaluar las propiedades del asfalto: la prueba de penetración, la prueba de estabilidad de Marshall y la prueba de reómetro de corte dinámico (DSR).

La prueba de penetración es un método común utilizado para determinar la consistencia del asfalto. Mide la profundidad a la que una aguja estándar penetra la muestra de asfalto bajo condiciones específicas de carga, tiempo y temperatura. El propósito de esta prueba es determinar la dureza o suavidad del asfalto, que es un factor importante en su desempeño como superficie de carretera. Para realizar la prueba, se coloca una muestra de asfalto cilíndrica en un recipiente y se calienta a una temperatura específica.

Luego se coloca una aguja estándar sobre la superficie de la muestra y se la deja penetrar durante cinco segundos bajo una carga específica. La profundidad de penetración se mide en décimas de milímetro. Los resultados de la prueba de penetración son significativos porque indican la consistencia del asfalto. Un valor de penetración alto indica que el asfalto es blando y puede ser propenso a formar surcos, mientras que un valor de penetración bajo indica que el asfalto es duro y puede ser propenso a agrietarse. Los resultados de las pruebas se pueden utilizar para determinar el grado apropiado de asfalto para una aplicación particular.

La prueba de estabilidad Marshall es un método ampliamente utilizado para evaluar la resistencia y estabilidad del asfalto. Mide la carga máxima que puede soportar una muestra de asfalto cilíndrico compactado antes de deformarse o romperse. El propósito de esta prueba es determinar la capacidad del asfalto para resistir la deformación y mantener su forma bajo cargas de tráfico. Para realizar la prueba, se prepara una muestra cilíndrica de asfalto compactando una cantidad específica de asfalto en un molde.

Luego, la muestra se coloca en una máquina de prueba y se somete a una carga de compresión a una velocidad específica. La carga se aumenta hasta que la muestra se deforma o se rompe. La carga máxima que puede soportar la muestra se registra como valor de estabilidad de Marshall. Los resultados de la prueba de estabilidad Marshall son importantes porque indican la resistencia y estabilidad del asfalto.

Un valor de estabilidad alto indica que el asfalto es fuerte y puede soportar cargas de tráfico pesado, mientras que un valor de estabilidad bajo indica que el asfalto es débil y puede ser propenso a deformarse y fallar. Los resultados de las

pruebas se pueden utilizar para determinar el espesor apropiado de asfalto para una aplicación particular.

La prueba de reómetro de corte dinámico (DSR) es un método utilizado para evaluar las propiedades viscoelásticas del asfalto. Mide la resistencia del asfalto a la deformación en un rango de temperaturas y condiciones de carga. El propósito de esta prueba es determinar la capacidad del asfalto para soportar cargas repetidas y cambios de temperatura a lo largo del tiempo. Para realizar la prueba, se coloca una pequeña muestra de asfalto entre dos placas paralelas en una máquina de prueba.

1.3.1. Estabilidad y flujo Marshall

La prueba de estabilidad Marshall es una prueba ampliamente utilizada para evaluar la resistencia y durabilidad del asfalto. Mide la resistencia del asfalto a la deformación y al agrietamiento en diferentes condiciones. La prueba consiste en compactar una muestra cilíndrica de asfalto a una temperatura específica y aplicar una carga vertical hasta que se produzca la falla. La carga máxima que la muestra puede soportar antes de fallar se conoce como Estabilidad Marshall.

Los componentes del equipo de prueba de estabilidad Marshall incluyen un molde de compactación, un marco de carga y un medidor de flujo. El procedimiento para realizar la prueba implica preparar la muestra de asfalto, colocarla en el molde de compactación y someterla a compactación y carga hasta que ocurra la falla.

La prueba de flujo es otra prueba importante que se utiliza para medir las propiedades del asfalto. Mide la capacidad del asfalto para fluir y compactarse a diferentes temperaturas. La prueba consiste en colocar una muestra cilíndrica de

asfalto en un molde y someterla a una carga constante mientras se aumenta la temperatura. Se mide la cantidad de deformación que se produce bajo la carga y el resultado se conoce como flujo. Los componentes del equipo de prueba de flujo incluyen un molde, un marco de carga y un termómetro. El procedimiento para realizar la prueba implica preparar la muestra de asfalto, colocarla en el molde y someterla a cargas y cambios de temperatura hasta lograr el resultado deseado.

Las pruebas Marshall de estabilidad y flujo son cruciales para determinar el diseño de mezcla asfáltica apropiado para una aplicación determinada. La prueba de Estabilidad Marshall mide la resistencia del asfalto a la deformación y al agrietamiento, lo cual es fundamental para garantizar la durabilidad y longevidad de carreteras y pavimentos. Cuanto mayor sea el valor de Estabilidad Marshall, mejor será la resistencia del asfalto a la deformación.

Por otro lado, la prueba de flujo mide la capacidad del asfalto para fluir y compactarse a diferentes temperaturas. Esto es importante para garantizar que el asfalto pueda soportar los cambios de temperatura y mantener su integridad a lo largo del tiempo. El diseño de mezcla apropiado para una aplicación determinada se puede determinar considerando los valores Marshall de estabilidad y flujo del asfalto.

Las pruebas Marshall de estabilidad y flujo son esenciales para evaluar las propiedades del asfalto y determinar el diseño de mezcla apropiado para una aplicación determinada. Estas pruebas proporcionan información valiosa sobre la resistencia, durabilidad y rendimiento del asfalto, que son factores críticos para garantizar la longevidad y seguridad de carreteras y pavimentos. Al comprender los componentes y procedimientos de estas pruebas y su importancia en el diseño de mezclas asfálticas, los ingenieros y profesionales de la construcción

pueden tomar decisiones informadas que resulten en estructuras asfálticas duraderas y de alta calidad.

Tabla 1.

Criterio de diseño de mezclas Marshall

MÉTODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) MARSHALL (AASHTO T 245)		
Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de	0,25 Pa-s (250 cS)	0,31 Pa-s (310 cS)
Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾	75	75
Estabilidad	5,338 N (1,200 libras)	
Fluencia en 0,25 mm (0,01 pulg.):		
Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	16
Tránsito > 10 ⁶ ESAL	8	14
Relación Estabilidad/Fluencia (lb/0,01 pulg.)	120	275
Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)		
Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto:		
Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
Relación finos/bitumen ⁽⁴⁾	0,6	1,6
Sensibilidad a la humedad		
AASHTO T 283, Resistencia Retenida	80 %	
Partículas Recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195	95 %	

Nota. Descripción de los requisitos para la mezcla de concreto asfáltico. Obtenido de la Dirección General de Caminos (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* (p. 401-7.) MICIVI.

1.3.1.1. Densidad de mezclas bituminosa (Bulk) AASHTO T 166

Las mezclas bituminosas son un componente vital de las aplicaciones de pavimento, constituyendo la capa superior del hormigón asfáltico. El rendimiento de estas mezclas está muy influenciado por su densidad, que es una propiedad crucial que debe medirse con precisión. El método Bulk, definido por la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO T 166), es una técnica ampliamente utilizada para medir la densidad aparente de mezclas bituminosas. Este ensayo explicará la importancia de la densidad de las mezclas bituminosas y cómo funciona el método Bulk (Álvarez, 2017).

La densidad de las mezclas bituminosas es una propiedad crítica que determina la calidad general y la durabilidad del pavimento. Es un factor esencial que afecta la resistencia del pavimento al desgaste y la deformación, así como su capacidad para soportar cargas pesadas y factores ambientales como la temperatura y la humedad. La densidad de la mezcla está directamente relacionada con su resistencia y estabilidad, por lo que es un parámetro crucial para evaluar durante el proceso de diseño y construcción del pavimento (Álvarez, 2017).

Además, la densidad de las mezclas bituminosas también afecta su rentabilidad general. Si la densidad no es uniforme y constante, puede provocar el envejecimiento prematuro y el agrietamiento del pavimento, lo que resulta en costosas reparaciones y mantenimiento. Por lo tanto, es imperativo medir la densidad de las mezclas bituminosas con precisión y consistencia (Álvarez, 2017).

El método Bulk, como lo define ASHTO T 166, es una técnica ampliamente aceptada para medir la densidad aparente de las mezclas bituminosas. Este método consiste en compactar un peso conocido de la mezcla y medir su volumen. La densidad aparente se puede calcular dividiendo el peso de la mezcla por su volumen en libras por pie cúbico o kilogramos por metro cúbico. El método Bulk es ventajoso porque es sencillo y se puede realizar en el campo, lo que lo convierte en una opción práctica para el control de calidad durante la construcción de pavimentos (Álvarez, 2017).

El método Bulk requiere una medida cilíndrica de metal, una varilla apisonadora y una balanza. capaz de medir el peso de la muestra. La mezcla se vierte en la medida cilíndrica y se compacta mediante 25 golpes de varilla apisonadora. El proceso se repite tres veces con la misma mezcla, y el volumen medio se calcula dividiendo la suma de los tres volúmenes por tres. Luego se calcula la densidad aparente dividiendo el peso de la muestra por el volumen promedio (Álvarez, 2017).

1.3.1.2. Densidad teórica máxima (RICE) AASHTO T 209-05

La densidad teórica máxima (RICE) es un método de prueba crucial utilizado en la industria del asfalto. Este método de prueba ayuda a determinar la densidad máxima que pueden alcanzar las mezclas asfálticas. La prueba se lleva a cabo compactando una muestra de mezcla asfáltica utilizando un dispositivo de compactación estandarizado. El resultado de esta prueba se expresa en porcentaje, lo que indica la máxima densidad teórica que se podría lograr si la mezcla asfáltica estuviera completamente libre de vacíos. Este ensayo discutirá la prueba de Densidad Teórica Máxima (RICE) en detalle, incluyendo el

procedimiento, el equipo utilizado y la importancia de los resultados de la prueba (Álvarez, 2017).

La prueba de Densidad Teórica Máxima (RICE) es un método usado para determinar la densidad máxima densidad de mezclas asfálticas. Esta prueba se realiza para garantizar que las mezclas asfálticas utilizadas en la construcción de carreteras y otros proyectos de infraestructura cumplan con los estándares de calidad requeridos. La prueba consiste en compactar una muestra de mezcla asfáltica utilizando un dispositivo de compactación estandarizado. La muestra se coloca en un molde y se compacta con un martillo que cae un número determinado de veces. El número de gotas depende del tipo de dispositivo de compactación utilizado. Luego se pesa la muestra compactada y se calcula la densidad aparente (Álvarez, 2017).

La prueba de densidad teórica máxima (RICE) es esencial en la industria del asfalto porque ayuda a determinar la calidad de las mezclas asfálticas. Los resultados de las pruebas se utilizan para determinar el contenido de vacíos de las mezclas asfálticas, que pueden afectar la durabilidad y el rendimiento del pavimento. Un bajo contenido de vacíos indica una mezcla densa, que es más resistente a la deformación y al agrietamiento, mientras que un alto contenido de vacíos indica una mezcla porosa, que es más susceptible al daño (Álvarez, 2017).

El procedimiento para realizar la prueba de densidad teórica máxima (RICE) implica varios pasos. El primer paso es preparar el molde de compactación limpiándolo a fondo y aplicando un desmoldeante. Luego, la muestra de mezcla asfáltica se coloca en el molde y se compacta con un martillo que cae un número específico de veces. El número de gotas depende del tipo de dispositivo de compactación utilizado. Una vez que se completa el proceso de compactación, se pesa la muestra compactada y se calcula la densidad aparente.

El equipo utilizado en la prueba de densidad teórica máxima (RICE) incluye un molde de compactación, un martillo de compactación, una balanza y un termómetro. El molde de compactación es un recipiente cilíndrico que se utiliza para contener la muestra de mezcla asfáltica. El martillo de compactación es un dispositivo que deja caer un número específico de veces para compactar la muestra. La balanza se usa para pesar la muestra compactada, mientras que el termómetro se usa para medir la temperatura de la muestra durante la prueba.

El resultado de la prueba de Densidad Teórica Máxima (RICE) se expresa como un porcentaje, lo que indica la máxima densidad teórica que podría lograrse si la mezcla asfáltica estuviera completamente libre de vacíos. Los resultados de las pruebas se utilizan para determinar la calidad de las mezclas asfálticas y para garantizar que cumplan con los estándares de calidad requeridos. Un valor porcentual alto indica una mezcla densa, que es más resistente a la deformación y al agrietamiento, mientras que un valor porcentual bajo indica una mezcla porosa, que es más susceptible al daño.

1.3.1.3. Ensayo de Stripping (adherencia) AASHTO T283-19

La prueba de decapado AASHTO es una prueba de laboratorio común utilizada para evaluar la susceptibilidad de las mezclas asfálticas al daño por humedad. La prueba implica exponer especímenes de asfalto al agua y medir el grado de falla de la unión del agregado de asfalto. Los resultados de esta prueba se utilizan para informar las prácticas de diseño y construcción de pavimentos. En este ensayo, exploraremos la Prueba de decapado de AASHTO con más detalle, incluido su propósito, metodología y significado en el diseño y la construcción de pavimentos (Álvarez, 2017).

La Prueba de decapado de AASHTO es una prueba de laboratorio utilizada para evaluar la resistencia de las mezclas asfálticas al daño por humedad. Esta prueba también se conoce como la prueba AASHTO T283-19, y es una de las pruebas más utilizadas para evaluar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al desprendimiento. El decapado es un tipo común de deterioro del pavimento causado por la pérdida de adherencia entre el aglomerante asfáltico y el agregado en presencia de humedad (Álvarez, 2017).

La prueba se lleva a cabo preparando especímenes cilíndricos de la mezcla asfáltica y exponiéndolos al agua en un ambiente controlado. Después de un período predeterminado, los especímenes se retiran del agua y se prueban para determinar el grado de falla de la unión del agregado de asfalto. Los resultados de la prueba se expresan como un porcentaje de la resistencia a la tracción retenida, que representa el grado de falla de la unión (Álvarez, 2017).

La prueba de decapado AASHTO implica exponer muestras de asfalto al agua y medir la extensión de la falla de la unión del agregado de asfalto. La prueba se realiza en un entorno controlado para garantizar que los resultados sean fiables y reproducibles. Los especímenes de prueba se preparan compactando mezclas asfálticas en moldes cilíndricos, que luego se curan y acondicionan de acuerdo con las especificaciones de la prueba. Luego, las muestras se sumergen en agua durante un período predeterminado, luego de lo cual se retiran y se prueban para determinar el grado de falla de la unión. Los resultados de la prueba se utilizan para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al decapado y para informar el diseño del pavimento y las prácticas de construcción (Álvarez, 2017).

Los resultados de la prueba de decapado AASHTO se utilizan para determinar la susceptibilidad de la mezcla asfáltica al decapado y para informar

al pavimento. prácticas de diseño y construcción. La prueba es ampliamente utilizada en la industria del asfalto para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas y determinar las mejores prácticas para el diseño y construcción de pavimentos. Los resultados de las pruebas se pueden utilizar para optimizar el diseño de la mezcla asfáltica y para seleccionar el ligante asfáltico más adecuado para una aplicación en particular. Los resultados también se pueden utilizar para evaluar la eficacia de varios agentes anti-decapado y para desarrollar nuevas tecnologías para mitigar el daño por humedad en los pavimentos de asfalto.

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Materiales utilizados

La mezcla asfáltica es un componente crucial en la construcción de carreteras, ya que proporciona una superficie resistente y duradera para vehículos y peatones. La preparación de la mezcla asfáltica implica una cuidadosa selección de las materias primas, un proceso de mezcla preciso y un meticuloso proceso de colocación y compactación. En este ensayo, exploraremos cada uno de estos procesos en detalle para comprender mejor cómo se prepara la mezcla asfáltica (Constructor Civil, 2011).

La selección de las materias primas es un paso crítico en la preparación de la mezcla asfáltica. Los dos componentes principales de la mezcla asfáltica son los agregados y el aglutinante asfáltico (betún). Los agregados son las piedras trituradas, la grava y la arena que brindan el soporte estructural para la mezcla asfáltica. El aglutinante de asfalto es la sustancia negra y pegajosa que une los agregados. Hay varios tipos de agregados utilizados en la mezcla de asfalto, incluidos el granito, la piedra caliza y la arenisca (Constructor Civil, 2011).

La selección del tipo apropiado de agregado depende de varios factores, como el clima, el volumen de tráfico y el nivel deseado de durabilidad. Del mismo modo, existen diferentes tipos de ligantes asfálticos disponibles, incluidos el asfalto modificado con polímeros y el asfalto emulsionado. La elección del aglutinante depende de factores como el rango de temperatura esperado y el nivel deseado de flexibilidad. El proceso de selección de materias primas apropiadas implica una cuidadosa consideración de estos factores, así como un

análisis del costo y la disponibilidad de los materiales. El objetivo es crear una mezcla de asfalto que sea duradera y rentable (Constructor Civil, 2011).

Figura 9.

Mezcla asfáltica



Nota. Muestra de mezcla asfáltica patrón trabajado en laboratorio. Elaboración propia.

2.2. Cemento asfáltico AC-30

El cemento asfáltico AC30 es un componente crucial en la construcción de carreteras y autopistas modernas. Es un tipo de aglutinante que se utiliza para mantener unidos los áridos que componen el pavimento. En este ensayo,

exploraremos en detalle la composición, las propiedades y las aplicaciones del cemento asfáltico AC30.

El cemento asfáltico AC30 está compuesto de betún y agregados como arena, grava y piedra triturada. La proporción de betún y áridos es fundamental para determinar las propiedades del cemento asfáltico AC30. El betún es un subproducto del petróleo que se deriva de la destilación del petróleo crudo. Es un líquido altamente viscoso que solidifica a temperatura ambiente. Los áridos, por su parte, son materiales naturales o sintéticos que se utilizan para reforzar la mezcla asfáltica. El tamaño y la forma de los agregados afectan la resistencia y durabilidad del pavimento. La proporción óptima de betún y agregados en el cemento asfáltico AC30 es típicamente entre 5 % y 7 % de betún por peso.

Figura 10.

Cemento asfáltico AC-30



Nota. Cemento asfáltico AC-30 en estado líquido. Elaboración propia.

El cemento asfáltico AC30 tiene varias propiedades que lo hacen ideal para la construcción de carreteras. Tiene excelentes propiedades adhesivas e impermeabilizantes, que ayudan a mantener intacto el pavimento y evitan que el agua se filtre a la subrasante. Es altamente viscoso y tiene un alto punto de reblandecimiento, lo que asegura que se mantenga estable a altas temperaturas. Esto lo hace adecuado para su uso en climas cálidos donde el pavimento está sujeto a un calor extremo. Además, el cemento asfáltico AC30 es duradero, con buena resistencia al desgaste, la oxidación y la intemperie. Estas propiedades

aseguran que el pavimento permanezca en buenas condiciones durante muchos años, lo que reduce la necesidad de reparaciones costosas.

El cemento asfáltico AC30 se usa principalmente en la construcción de pavimentos asfálticos, incluidas carreteras, estacionamientos y pistas de aterrizaje. También se utiliza en la construcción de membranas impermeabilizantes para cubiertas y cimientos. El cemento asfáltico AC30 se prefiere a otros aglomerantes debido a su excelente desempeño, bajo costo y facilidad de disponibilidad. Además, es fácil de transportar y aplicar, lo que lo convierte en una opción popular para proyectos de construcción de carreteras en todo el mundo (Domínguez, 2015).

El cemento asfáltico AC30 es un componente esencial en la construcción de carreteras y autopistas modernas. Sus excelentes propiedades adhesivas e impermeabilizantes, alta viscosidad y durabilidad lo hacen ideal para usar en climas cálidos y áreas con mucho tráfico. Es ampliamente utilizado en la construcción de pavimentos asfálticos, estacionamientos y pistas de aterrizaje, así como en la construcción de membranas impermeabilizantes para techos y cimientos. Con su bajo costo y facilidad de disponibilidad, es probable que el cemento asfáltico AC30 siga siendo una opción popular para los proyectos de construcción de carreteras durante muchos años.

2.3. Agregado grueso

El asfalto es un material común utilizado en la construcción de carreteras, y la calidad de la mezcla asfáltica es fundamental para la longevidad y la seguridad de la carretera. El agregado grueso es un componente crucial de la mezcla asfáltica, y sus propiedades y tipos pueden afectar significativamente el

desempeño del asfalto. En este ensayo, analizaremos las propiedades y los tipos de agregado grueso para asfalto y los factores que afectan su selección.

Tabla 2.

Características físicas del agregado grueso

Peso específico	1.97
Peso unitario compactado (Kg/m ³)	1 500,00
Peso unitario suelto (Kg/m ³)	1 390,00
Porcentaje de absorción	0,76
Pasa tamiz # 200 (%)	1,00
Porcentaje de vacíos (%)	41,00
Módulo de finura	5,68

Nota. Descripción de las características físicas del agregado grueso. Elaboración propia, realizado con Excel.

Las propiedades del agregado grueso para asfalto juegan un papel fundamental en el desempeño de la mezcla asfáltica. La granulometría y la distribución del tamaño de las partículas son factores esenciales.

Figura 11.

Piedra triturada utilizada como agregado grueso



Nota. Muestra de piedra triturada utilizada para el agregado grueso. Elaboración propia.

Para el presente trabajo se utilizó el piedrín de $\frac{3}{4}$ de pulgada para filtrarlo se usó un tamiz para crear una capa con un grosor de una sola medida de 10 cm antes de comenzar la mezcla. Por último, el piedrín $\frac{3}{4}$ de pulgada fue utilizado para la elaboración de la muestra indicadas por el asesor. Este material fue comprado en la empresa Agreca S.A. ubicada en Palín Escuintla

2.4. Agregado fino (arena de río)

Los agregados finos juegan un papel crucial en el rendimiento y la durabilidad de las mezclas asfálticas. Las propiedades de los agregados finos, como la granulometría, la forma, la textura y las características de la superficie, afectan el desempeño del pavimento. El control de calidad y la selección de los agregados finos en base a sus propiedades y requerimientos de desempeño son fundamentales para asegurar el correcto desempeño y durabilidad del pavimento (Gómez, 2012).

Figura 12.

Arena de río utilizada como agregado fino



Nota. Muestra de arena de río utilizada como agregado fino. Elaboración propia.

Tabla 3.*Características físicas agregado fino*

Peso específico	2,60
Peso unitario compactado (Kg/m ³)	1 760,00
Peso unitario suelto (Kg/m ³)	1 670,00
Porcentaje de vacíos (%)	41,00
Porcentaje de absorción (%)	0,70
Contenido de materia orgánica	1
Pasa tamiz # 200 (%)	4,72
Retenido tamiz 6,35 (%)	0,00
Módulo de finura	2.6

Nota. Descripción de las características físicas del agregado fino. Elaboración propia, realizado con Excel.

Los límites del peso específico para agregados finos los valores oscilan entre 2,40 y 2,90, el resultado de la prueba realizada es de 2,60, por lo que se determinó que cumple con lo requerido para esta investigación

2.5. Polibutadieno

El polibutadieno es un caucho sintético que se usa ampliamente en diversas aplicaciones industriales debido a sus propiedades y estructura únicas. Es un polímero altamente elástico y resistente que exhibe una excepcional resistencia a la tracción y una baja acumulación de calor. En este ensayo, exploraremos la estructura y las propiedades del polibutadieno, los métodos utilizados para su síntesis y sus diversas aplicaciones en diferentes industrias.

El polibutadieno es un polímero compuesto por unidades repetitivas de butadieno, una molécula de cuatro carbonos. con dos dobles enlaces. La

estructura química del polibutadieno es muy flexible, lo que le permite estirarse y volver a su forma original sin perder su elasticidad. Esta estructura única también lo hace altamente resistente al desgaste, lo que lo convierte en un material ideal para la producción de neumáticos. Además, el polibutadieno tiene una temperatura de transición vítrea baja, lo que significa que permanece flexible incluso a bajas temperaturas. Esta propiedad lo hace ideal para su uso en aplicaciones de clima frío, como juntas y sellos para congeladores.

La síntesis de polibutadieno se puede lograr a través de diferentes métodos, como polimerización aniónica, polimerización catiónica y polimerización Ziegler-Natta. La polimerización aniónica es el método más común utilizado para la síntesis de polibutadieno. Implica el uso de un iniciador, normalmente un compuesto de alquil litio, para iniciar la polimerización del butadieno.

La polimerización catiónica, por otro lado, implica el uso de un catalizador ácido de Lewis para iniciar la polimerización de butadieno. La polimerización Ziegler-Natta es un método más complejo que implica el uso de un catalizador de metal de transición. Cada método de síntesis tiene sus ventajas y desventajas, y la elección del método depende de las propiedades deseadas del producto final.

El polibutadieno tiene una amplia gama de aplicaciones industriales, incluida la producción de neumáticos, adhesivos, revestimientos y plastificantes. Su alta resiliencia y baja acumulación de calor lo convierten en un material ideal para la producción de neumáticos. En adhesivos y revestimientos, el polibutadieno se utiliza como aglutinante debido a sus excelentes propiedades de adhesión. Los plastificantes a base de polibutadieno se utilizan para aumentar la flexibilidad de los plásticos.

Además, el polibutadieno tiene posibles aplicaciones futuras en industrias emergentes como la biomedicina y el almacenamiento de energía. En biomedicina, se puede utilizar como sistema de administración de fármacos debido a su biocompatibilidad y biodegradabilidad. En el almacenamiento de energía, el polibutadieno se puede utilizar como material de electrodo de alto rendimiento debido a sus excelentes propiedades electroquímicas.

El polibutadieno es un polímero versátil con propiedades únicas que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones industriales. Su estructura química, métodos de síntesis y aplicaciones se han discutido en este ensayo. El potencial del polibutadieno para futuras aplicaciones en industrias emergentes lo convierte en un material emocionante para observar en los próximos años.

Figura 13.

Polibutadieno triturado como agente modificador



Nota. Muestra de polibutadieno triturado como agente modificador. Elaboración propia.

Uno de los problemas más comunes asociados con los materiales de mezcla asfáltica es el daño por humedad. Cuando el agua ingresa a la superficie de la carretera, puede causar que el asfalto se deteriore y se debilite. Para evitar esto, se pueden agregar agentes anti-stripping a los materiales de mezcla asfáltica para mejorar su resistencia al agua. Estos agentes funcionan adhiriéndose a la superficie de los agregados y evitando que el agua se adhiera a ellos.

2.6. Diseño teórico para la mezcla de asfáltica

Las proporciones establecidas para el diseño teórico, cuenta con la cantidad de los materiales a utilizar para el proceso de la elaboración de la mezcla; sus proporciones no tienen aditivos químicos o materiales distintos. Al igual la función de las proporciones se deben seleccionar para facilitar la colocación, la densidad de la mezcla, resistencia y durabilidad para la aplicación del mismo en el proyecto

2.6.1. Mezcla asfáltica patrón

La muestra asfáltica patrón es la muestra de asfalto en caliente que cumple con las especificaciones granulométricas que estable la dirección general de caminos en el libro azul, por lo cual es la muestra que se tomara como referencia para verificar los cambios existentes al momento de modificar algún componente si este fuera el caso.

Tabla 4.

Diseño de mezcla patrón con una graduación de granulometría E (12.5 mm)

Tamiz	Abertura(mm)	Agregado Grueso	Agregado Fino	Diseño	% retenido
3/4"	19	100	100	100	0
1/2"	12.5	90	100	93	7
#4	4.75	44	74	60	33
#8	2.36	28	58	40	20
#50	0.3	5	21	19	21
#200	0.075	2	10	7	12
Fondo					7
Total					100

Nota. Descripción de mezcla patrón con una graduación de granulometría E(12.5 mm).
Elaboración propia, realizado con Excel.

Las probetas utilizadas para este trabajo de investigación se diseñaron en base a las especificaciones que proporciona el libro azul correspondientes a la graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico según la norma ASTM D 3515.

Tabla 5.

Diseño de probeta de mezcla patrón con un peso de 1000 gramos

Tamiz	Abertura(mm)	Peso por tamiz (Gramos)
3/4"	19	0
1/2"	12.5	70
#4	4.75	330
#8	2.36	200
#50	0.3	210
#200	0.075	120
Fondo		70
Total		1000 g

Nota. Descripción de probeta de mezcla patrón con un peso de 1000 gramos. Elaboración propia, realizado con Excel.

2.6.2. Mezcla asfáltica modificada con polibutadieno

Para este trabajo de graduación se utilizó el polibutadieno con tamaño 0.3mm como agente modificador, para lo cual se realizó su respectiva granulométrica, dando como resultado una retención total en el tamiz #50.

Tabla 6.

Granulometría de polibutadieno

Tamiz	Abertura(mm)	% de retención
3/4"	19	0
1/2"	12.5	0
#4	4.75	0
#8	2.36	0
#50	0.3	100
#200	0.075	0
Fondo		0
Total		100

Nota. Descripción de granulometría de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 14.

Granulometría polibutadieno



Nota. Muestra de granulometría polibutadieno. Elaboración propia.

Tabla 7.*Diseño de mezclas modificadas con polibutadieno en diferente porcentaje*

2 % Polibutadieno			4 % Polibutadieno			6 % Polibutadieno		
Tamiz	Abertura a (mm)	Peso por tamiz(g)	Tamiz	Abertura a (mm)	Peso por tamiz(g)	Tamiz	Abertura a (mm)	Peso por tamiz(g)
3/4"	19	0	3/4"	19	0	3/4"	19	0
1/2"	12.5	70	1/2"	12.5	70	1/2"	12.5	70
#4	4.75	330	#4	4.75	330	#4	4.75	330
#8	2.36	180	#8	2.36	160	#8	2.36	140
#50	0.3	210	#50	0.3	210	#50	0.3	210
#200	0.075	120	#200	0.075	120	#200	0.075	120
Fondo		70	Fondo		70	Fondo		70
Polibutadie no		20	Polibutadie no		40	Polibutadie no		60
Total		1000	Total		1000	Total		1000

Nota. Descripción de mezclas modificadas con polibutadieno en diferente porcentaje. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 8.*Graduación de agregados para pavimento de concreto asfáltico (ASTM D 3515)*

Tamaño de Tamiz	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal (1)					
	A (50.8 mm)	B (38.1 mm)	C (25.4 mm)	D (19 mm)	E (12.5 mm)	F (9.5 mm)
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
63,00 mm	100					
50,00 mm	90-100	100				
38,10 mm	-	90-100	100			
25,00 mm	60-80	-	90-100	100		
19,00 mm	-	50-80	-	90-100	100	
12,5 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,5 mm	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75 mm	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36 mm	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0,30 mm	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075 mm	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

(1) El Tamaño máximo nominal es el tamaño del tamiz mayo siguiente al primer tamiz que retenga más del 10% del agregado combinado. El tamaño máximo es el del tamiz mayor correspondiente al tamaño máximo nominal.

Nota. Descripción de porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27 y T 11). Obtenido de Dirección General de Caminos (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* (p.401-3.) MICIVI.

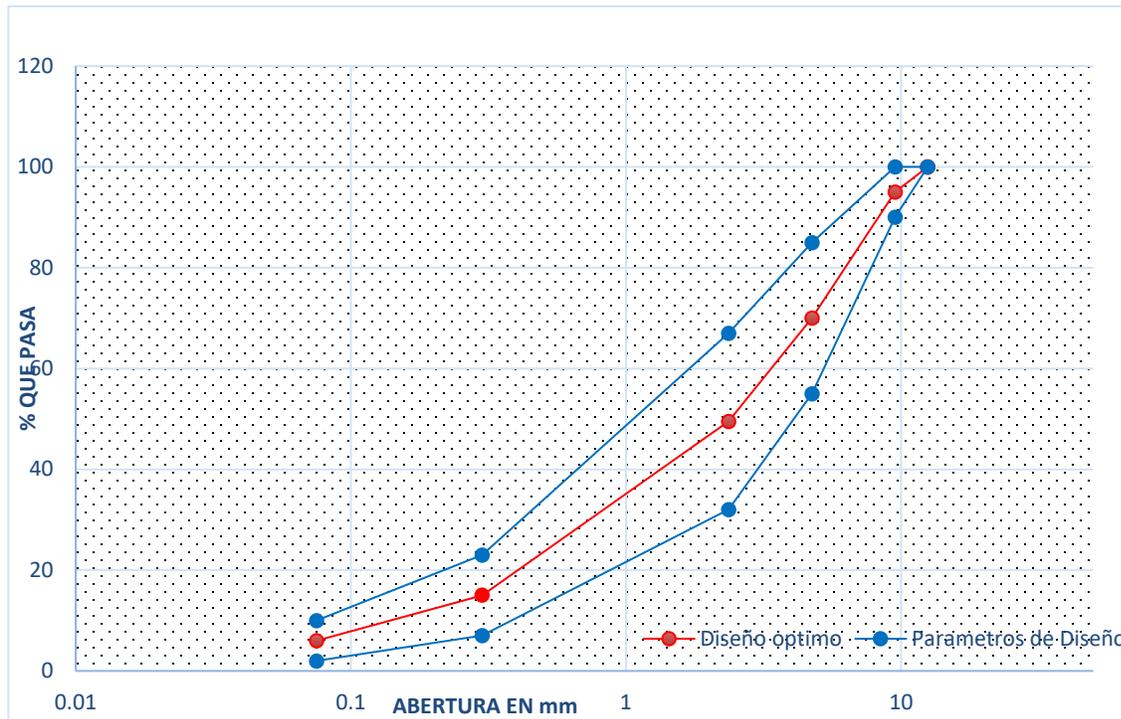
Tabla 9.*Diseño granulométrico por el método Marshall*

No de Tamiz	Abertura de tamices en mm	Grafica máxima	Grafica mínima	Grafica de diseño
		% pasa	% pasa	% pasa
1/2"	12.5	100	100	100
3/8"	9.5	90	100	95
#4	4.75	55	85	70
#8	2.36	32	67	49.5
#50	0.3	7	23	15
#200	0.075	2	10	6

Nota. Descripción de granulométrico por el método Marshall. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 15.

Gráfica granulométrica de diseño Marshall optimo



Nota. Presentación de ca granulométrica de diseño Marshall optimo. Elaboración propia, realizado con Excel.

2.7. Ensayos de laboratorio

La norma ASTM D 1559 es la encargada de determinar el procedimiento de estos ensayos. Esta norma detalla los diferentes pasos que se deben de seguir para determinar la resistencia a la deformación plástica de las briquetas de mezcla asfáltica. Los ensayos de: gravedad específica bruta, gravedad teórica máxima, porcentaje de vacíos-densidad y estabilidad-flujo, son los ensayos que se deben de realizar según la metodología del método Marshall.

2.7.1. Preparación de probetas de mezcla asfáltica en caliente AASHTO T 245 y ASTM D 1559

La preparación de muestras de mezcla asfáltica en caliente es un paso esencial para determinar la calidad y el rendimiento de los pavimentos asfálticos. Dos métodos comúnmente usados para preparar especímenes de mezcla asfáltica en caliente son AASHTO T 245 y ASTM D 1559. En este ensayo, discutiremos los procedimientos involucrados en la preparación de especímenes usando estos métodos, así como las mejores prácticas para asegurar resultados precisos y confiables. Para preparar muestras de mezcla asfáltica en caliente con AASHTO T 245, normalmente se siguen los siguientes pasos.

Primero, reúna los materiales necesarios, incluidos los agregados, el aglomerante asfáltico y el equipo de compactación. Luego, tome una muestra del agregado y tamícelo para determinar su gradación. Una vez determinada la gradación, mezcle el agregado y el ligante asfáltico en las proporciones deseadas. Finalmente, compacte la mezcla usando un compactador giratorio para producir el espécimen. Es importante tener en cuenta que la calidad del espécimen producido con este método depende en gran medida de la precisión de la gradación y la proporción de agregado y aglomerante asfáltico.

Por lo tanto, es fundamental seguir los procedimientos estándar para el muestreo, la mezcla y la compactación para garantizar resultados precisos y confiables. Para preparar muestras de mezcla asfáltica en caliente utilizando la norma ASTM D 1559, normalmente se siguen los siguientes pasos. Primero, recopile los materiales necesarios, incluidos los agregados, el aglutinante de asfalto y el ensamblaje del molde. Luego, tome una muestra del agregado y tamícelo para determinar su gradación.

Una vez determinada la gradación, mezcle el agregado y el ligante asfáltico en las proporciones deseadas. Finalmente, compacte la mezcla utilizando el conjunto de moldes para producir la muestra. Similar a AASHTO T 245, la precisión de la gradación y la proporción del agregado y el aglutinante de asfalto son cruciales para producir una muestra de alta calidad. Por lo tanto, es importante seguir los procedimientos estándar para el muestreo, la mezcla y la compactación para garantizar resultados precisos y confiables.

Para garantizar resultados precisos y confiables al preparar muestras de mezcla asfáltica en caliente, es importante seguir las mejores prácticas. Primero, siga los procedimientos estándar para el muestreo, la mezcla y la compactación. Esto ayudará a garantizar la consistencia y precisión en los resultados. En segundo lugar, asegúrese de que el equipo esté debidamente calibrado y mantenido. Esto incluye asegurarse de que el equipo de compactación esté calibrado con la configuración adecuada y que el ensamblaje del molde esté limpio y sin defectos.

Finalmente, utilice materiales de alta calidad que cumplan con las especificaciones necesarias. Esto ayudará a garantizar que la muestra refleje con precisión el desempeño del pavimento de asfalto. En conclusión, la preparación de muestras de mezcla asfáltica en caliente es un paso crucial para determinar la calidad y el rendimiento de los pavimentos asfálticos. Al seguir los procedimientos estándar para el muestreo, la mezcla y la compactación, garantizar que el equipo esté correctamente calibrado y mantenido, y utilizar materiales de alta calidad, se pueden lograr resultados precisos y confiables.

2.7.1.1. Metodología para preparación de probetas

- Secar por completo el agregado grueso y fino.
- Tamizar el material, según la graduación designada de los agregados.
- Calentar el bitumen a utilizarse en la mezcla asfáltica.
- En taras colocar el material con las cantidades ya establecidas en el diseño de mezcla asfáltica.

Figura 16.

Colocación de agregados en taras



Nota. Muestra de agregados en taras utilizados para los ensayos. Elaboración propia.

- Calentar agregados y mezclar agregados hasta obtener una temperatura en la mezcla de 110 °C.
- Calentar el molde, collar y placa base utilizados para el moldeo de la probeta.

Figura 17.

Calentamiento de materiales, molde, collas y placa base en horno industrial



Nota. Calentamiento con moldes de muestras de materiales, collas y placa base en horno industrial. Elaboración propia.

- Se prepara una serie de probetas con distintos contenidos de bitumen y distinto porcentaje de caucho molido: Briqueta mezcla patrón: 8 %, 9 %, 10 %, 11 % y 12 % Briqueta con 2 % de Caucho: 8 %, 9 %, 10 %, 11 % y 12 % Briqueta con 4 % de Caucho: 8 %, 9 %, 10 %, 11 % y 12 % Briqueta con 6 % de Caucho: 8 %, 9 %, 10 %, 11 % y 12 % Para cada porcentaje se realizaron 3 briquetas.
- Se mezclan los agregados con el bitumen hasta alcanzar una temperatura de 140°C.
- Colocar aceite en los dispositivos de moldeo de probetas.
- Por medio de un embudo y con ayuda de una espátula colocar la mezcla asfáltica en los moldes apisonado 15 veces a su alrededor y 10 en su interior.

Figura 18.

Colocación de mezcla asfáltica en moldes de apisonado



Nota. Colocación de mezcla asfáltica en moldes. Elaboración propia.

- La mezcla se compacta con una temperatura de 140°C utilizando un martillo con 75 golpes en cada cara de la probeta.

Figura 19.

Compactación de mezcla asfáltica patrón y mezcla modificada con polibutadieno



Nota. Compactación de mezcla asfáltica patrón y mezcla modificada con polibutadieno. Elaboración propia.

- Se retira el dispositivo de moldeo. La probeta de asfalto ya compactada se deja reposar por 24 horas para poder ser desencontrada.

Figura 20.

Desmoldado de probeta de asfalto



Nota. Desmoldado de probeta de asfalto. Elaboración propia.

2.7.2. Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica

A continuación, se presenta la metodología y se describe de manera concreta el procedimiento para determinar los valores de la gravedad específica Bulk.

2.7.2.1. Metodología

Las normas utilizadas para este ensayo son: ASTM D 2726 y AASHTO T 166.

Procedimiento

- Determinar el peso seco de la briqueta
- Sumergir la muestra en un recipiente por 5 minutos

Figura 21.

Probeta de mezcla patrón sumergida en agua



Nota. Probeta de mezcla patrón sumergida en tanque de agua. Elaboración propia.

- Al transcurrir los 5 minutos sacar la briqueta y con papel mayordomo quitar exceso de agua y se toma el peso saturado.
- Se sumerge la briqueta nuevamente y se deja suspendida dentro del agua, cuando la masa es constante se toma el peso sumergido.
- Con los pesos obtenidos de los pasos anteriores se calcula la gravedad específica bulk de la muestra.

$$G_{mb}=A/(B-C)$$

Donde:

G_{mb} =Gravedad específica Bulk

A=masa de briqueta(g)

B=masa de la briqueta saturada(g)

C=masa de la briqueta sumergida(g)

2.7.3. Gravedad específica teórica máxima rice

A continuación, se presente la metodología y se describe el procedimiento utilizado en la determinación de la gravedad específica rice, así como también se hace mención de las normas que rigen este ensayo.

2.7.3.1. Metodología

Las normas utilizadas para la determinación de la gravedad específica teórica máxima son ASTM D 2041 y AASHTO T 209.

- Procedimiento
 - Colocar la probeta en una tara y secarla en el horno.

Figura 22.

Colocación de probetas en horno industrial para secado



Nota. Probetas en horno industrial para secado. Elaboración propia.

- Sacar del horno y desintegrar la probeta con ayuda de una espátula.

Figura 23.

Desintegración de probeta con espátula



Nota. Desintegración de probeta con espátula. Elaboración propia.

- Tomar el peso del picnómetro lleno de agua.

Figura 24.

Peso de picnómetro lleno de agua



Nota. Peso de picnómetro lleno de agua. Elaboración propia.

- Cuando el peso de la muestra sea constante o no tenga variación, verter todos los agregados en el picnómetro vacío.
- Llenar totalmente de agua el picnómetro con los agregados hasta que el espejo de agua sea superior a una pulgada por encima de la mezcla.
- Colocar el picnómetro con la mezcla y agua sobre el agitador y activar la bomba de vacíos.

Figura 25.

Picnómetro sobre agitador



Nota. Picnómetro sobre agitador. Elaboración propia.

- Se libera gradualmente la presión de vacíos, una vez hayan transcurrido 15 minutos.

- Se llena totalmente el picnómetro de agua, tratando de no generar turbulencia para evitar vacíos, se toma el peso total del picnómetro.
- Se calcula el valor

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E}$$

Donde:

A=masa de la muestra seca(g)

D=masa del picnómetro lleno de agua(g)

E=masa del picnómetro + mezcla + agua

2.7.4. Porcentaje de vacíos-densidad de mezcla asfáltica

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento para la determinación del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica compactada.

2.7.4.1. Metodología

Las normas utilizadas para este ensayo son ASTM D 3203 y AASHTO T 269:

- Se determina el valor de la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica (numeral 2.3.2.).

- Se determina el valor de la gravedad específica teórica máxima de la mezcla (numeral 4.7.4).
- Se realiza el cálculo del porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica.

$$VA = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Donde:

VA= porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bulk

2.7.5. Prueba de estabilidad-flujo Marshall

A continuación, se presenta la metodología y se describe el procedimiento utilizado en el ensayo de Estabilidad-Flujo en MAC, ensayo utilizado en muestras de asfalto trabajado en caliente.

Procedimiento

- Colocar parte de las briquetas en el baño maría con agua, dejarlas sumergidas durante 45 minutos a 60°C.

Figura 26.

Colocación de probetas de mezcla patrón en baño maría



Nota. Probetas de mezcla patrón en baño maría. Elaboración propia.

- Limpiar todo el equipo a utilizar para evitar errores al momento de realizar el ensayo.
- Secar briqueta y equipo para posteriormente colocar la briqueta al centro de las mordazas y dar paso a la aplicación de carga. Realizar la toma de datos indicados por el dinamómetro y el deformímetro.

Figura 27.

Secado de probetas



Nota. Secado de probetas de mezcla patrón y mezcla modificada con polibutadieno en porcentajes variados. Elaboración propia.

Figura 28.

Colocación de probetas en máquina Marshall



Nota. Proceso de colocación de probetas en máquina Marshall. Elaboración propia.

- Con los datos obtenidos se puede realizar el cálculo de la resistencia en libras-fuerza.
- Ya teniendo los cálculos de la resistencia se procede a la corrección de los datos aplicando un factor de corrección dependiendo de la carga.

3. RESULTADOS

3.1. Mezcla patrón

La mezcla maestra de asfalto es un componente crucial de los proyectos modernos de construcción y pavimentación de carreteras. Es una mezcla especialmente formulada de agregados, aglutinantes y aditivos que proporciona una superficie resistente y duradera para el tráfico de vehículos y peatones. En este ensayo, profundizaremos en la composición, producción y aplicaciones de la mezcla maestra de asfalto.

La mezcla maestra de asfalto se compone de una variedad de materiales agregados, que incluyen piedra triturada, arena y grava. Estos materiales se seleccionan y mezclan cuidadosamente para lograr la gradación y la distribución del tamaño de partícula deseadas. El tamaño y la forma de las partículas de agregado juegan un papel fundamental en el desempeño de la mezcla asfáltica, ya que afectan la resistencia, la estabilidad y la durabilidad del producto terminado. Además de los agregados, la mezcla maestra de asfalto contiene aglutinantes que mantienen unida la mezcla.

El aglutinante más común utilizado en las mezclas asfálticas es el cemento asfáltico, un material a base de petróleo que se deriva del petróleo crudo. Sin embargo, el asfalto modificado con polímeros también se está volviendo cada vez más popular debido a su rendimiento superior en condiciones climáticas extremas y tráfico intenso. Para mejorar el rendimiento de la mezcla maestra asfáltica, se incorporan varios aditivos a la mezcla. Estos aditivos pueden incluir

agentes anti-stripping, que evitan que el asfalto se separe del agregado, o fibras, que mejoran la resistencia y durabilidad de la mezcla.

La producción de la mezcla maestra asfáltica implica un proceso de mezcla complejo que garantiza la correcta mezcla de todos los componentes. El proceso de mezcla se puede realizar en una planta dosificadora o en una planta de tambor, según los requisitos específicos del proyecto. En las plantas por lotes, los componentes se mezclan en lotes individuales, mientras que, en las plantas de tambor, la mezcla se produce de forma continua. La temperatura es un factor crítico en la producción de mezcla maestra asfáltica. La mezcla debe calentarse a un rango de temperatura específico para asegurar una mezcla y compactación adecuadas.

Los requisitos de temperatura pueden variar según el tipo de ligante utilizado, el tamaño y la forma de las partículas de agregado y los aditivos incorporados a la mezcla. Las medidas de control de calidad son esenciales en la producción de mezcla maestra asfáltica para garantizar que la mezcla cumpla con las especificaciones deseadas. Estas medidas pueden incluir análisis de tamiz, que determina la distribución del tamaño de las partículas del agregado, y pruebas de gradación, que evalúan la uniformidad de la mezcla.

La mezcla maestra de asfalto se usa ampliamente en la construcción de carreteras y caminos, proporcionando una superficie suave y duradera para tráfico de alta velocidad. También se utiliza en la construcción de pistas de aeropuertos, donde puede soportar las cargas pesadas y las tensiones de los aterrizajes y despegues de aeronaves. Además, la mezcla maestra asfáltica se usa comúnmente en proyectos de pavimentación residenciales y comerciales, proporcionando una solución rentable y duradera para entradas de vehículos, estacionamientos y otras superficies.

La mezcla maestra asfáltica es una solución versátil y material esencial en los proyectos modernos de construcción y pavimentación de carreteras. Su composición, producción y aplicaciones son complejas y requieren una cuidadosa atención a los detalles para garantizar que el producto terminado cumpla con las especificaciones deseadas. Al comprender las propiedades y características de la mezcla maestra de asfalto, podemos continuar mejorando e innovando en el campo de la construcción de carreteras y el desarrollo de infraestructura.

3.1.1. Gravedad específica Bulk ASTM D 2726 y ASTM D 1188

Los resultados de gravedad específica Bulk se realizaron siguiendo los procedimientos indicados según las normas que rigen a este ensayo, los procedimientos fueron efectuados en mezcla patrón con diferente porcentaje de bitumen.

3.1.1.1. Gravedad específica

Los resultados de gravedad específica, muestran las variaciones sufridas por las pastillas de mezcla patrón con distintos porcentajes de bitumen utilizado.

Tabla 10.*Datos peso en aire, peso seco saturado, peso sumergido y gravedad específica*

Patrón	Peso en aire	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gravedad Especifica
1 pastilla 8 %	1143.15	1145.23	634.05	2.236
2 pastilla 8 %	1162.65	1165.77	640.40	2.213
3 pastilla 8 %	1152.90	1155.50	637.23	2.224
1 pastilla 9 %	1152.32	1153.67	642.01	2.252
2 pastilla 9 %	1161.86	1163.04	654.37	2.284
3 pastilla 9 %	1157.09	1158.36	648.19	2.268
1 pastilla 10 %	1166.60	1168.08	656.70	2.281
2 pastilla 10 %	1177.17	1178.79	657.42	2.258
3 pastilla 10 %	1171.89	1173.44	657.06	2.269
Patrón	Peso en aire	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gravedad Especifica
1 pastilla 11 %	1175.86	1177.23	662.12	2.283
2 pastilla 11 %	1182.47	1183.48	664.72	2.279
3 pastilla 11 %	1179.17	1180.36	663.42	2.281
1 pastilla 12 %	1205.23	1205.98	673.46	2.263
2 pastilla 12 %	1193.95	1194.47	670.56	2.279
3 pastilla 12 %	1199.59	1200.23	672.01	2.271

Nota. Presentación de resultados de peso en aire, peso seco saturado, peso sumergido y gravedad específica. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.1.1.1. Gravedad específica Bulk promedio

La gravedad específica Bulk promedio no más que el promedio de gravedades específicas de cada punto muestreado.

Tabla 11.*Gravedad específica Bulk promedio*

PATRÓN	1 pastilla 8 %	2 pastilla 8 %	3 pastilla 8 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2363	Gmb 2.2130	Gmb 2.2245	2.225
	1 pastilla 9 %	2 pastilla 9 %	3 pastilla 9 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2521	Gmb 2.2841	Gmb 2.2681	2.268
	1 pastilla 10 %	2 pastilla 10 %	3 pastilla 10 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2813	Gmb 2.2578	Gmb 2.2694	2.270
	1 pastilla 11 %	2 pastilla 11 %	3 pastilla 11 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2827	Gmb 2.2794	Gmb 2.2811	2.281
	1 pastilla 12 %	2 pastilla 12 %	3 pastilla 12 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2633	Gmb 2.2789	Gmb 2.2710	2.281

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica BULK promedio. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.2. Gravedad Teórica Máxima Rice ASTM D 2041 y AASHTO T 209

Los resultados de gravedad teórica máxima Rice muestra el porcentaje de vacíos presentes en las mezclas asfálticas trabajadas en caliente, los resultados mostrados corresponden a la mezcla patrón trabajada.

Tabla 12.*Gravedad teórica máxima Rice para probeta de mezcla Patrón*

Tipo de pastilla	% De bitumen en mezcla	Peso seco de muestra (A)	Peso de picnómetro+ agua (G)	Peso de picnómetro + material +agua (G)	Gravedad específica teórica máxima
Patrón	8 %	1149.32	7379.40	8047.30	2.387
	9 %	1161.34	7378.20	8044.40	2.346
	10 %	1171.52	7378.90	8047.10	2.329
	11 %	1178.60	7379.10	8045.10	2.299
	12 %	1193.12	7377.90	8050.30	2.292

Nota. Presentación de resultados de gravedad Teórica Máxima Rice para probeta de mezcla Patrón. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.3. Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 2303 y AASHTO T 269

Los resultados obtenidos por la relación de porcentaje de vacíos-densidad garantizan que los rangos de vacíos en la mezcla asfáltica patrón cumplan con las condiciones de relaciones volumétricas para tener un buen control de calidad.

Tabla 13.*Porcentaje de vacíos en mezcla asfáltica patrón*

Tipo de pastilla	% de Bitumen en Mezcla	Gravedad específica Bulk	Gravedad específica teórica máxima	Porcentaje de vacíos %
Patrón	8	2.225	2.387	6.820
	9	2.268	2.346	3.303
	10	2.270	2.329	2.552
	11	2.281	2.299	0.791
	12	2.281	2.292	0.459

Nota. Presentación de resultados de porcentaje de vacíos en mezcla asfáltica patrón. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.4. Estabilidad- flujo Marshall ASTM D 1559 y AASHTO T 245

La Estabilidad y flujo Marshall indicaran la resistencia (Estabilidad) y la Deformación (Flujo) que sufren las pastillas de la mezcla patrón.

Tabla 14.

Estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica patrón

1 patrón 8 %		2 patrón 8 %		3 patrón 8 %		Promedio carga 8 %
Estabilidad	374.00	Estabilidad	366.00	Estabilidad	370.00	Carga
Lbf	3550.00	Lbf	3500.00	Lbf	3500.00	3388.33
Corrección	3550.00	Corrección	3255.00	Corrección	3360.00	Flujo
Flujo	13.00	Flujo	11.00	Flujo	12.00	12.00
1 patrón 9 %		2 patrón 9 %		3 patrón 9 %		Promedio carga 9 %
Estabilidad	373.00	Estabilidad	358.00	Estabilidad	366.00	Carga
Lbf	3550.00	Lbf	3400.00	Lbf	3500.00	3391.33
Corrección	3550.00	Corrección	3264.00	Corrección	3360.00	Flujo
Flujo	11.00	Flujo	12.00	Flujo	12.00	11.67
1 patrón 10 %		2 patrón 10 %		3 patrón 10 %		Promedio carga 10 %
Estabilidad	352.00	Estabilidad	335.00	Estabilidad	301.00	CARGA
Lbf	3350.00	Lbf	3200.00	Lbf	2900.00	3068.67
Corrección	3350.00	Corrección	3072.00	Corrección	2784.00	FLUJO
Flujo	14.00	Flujo	15.00	Flujo	15.00	14.67
1 patrón 11 %		2 patrón 11 %		3 patrón 11 %		Promedio carga 11 %
Estabilidad	332.00	Estabilidad	320.00	Estabilidad	318.00	CARGA
Lbf	3150.00	Lbf	3050.00	Lbf	3050.00	3083.33
Corrección	3150.00	Corrección	3050.00	Corrección	3050.00	FLUJO
Flujo	14.00	Flujo	16.00	Flujo	15.00	15.00
1 patrón 12 %		2 patrón 12 %		3 patrón 12 %		Promedio carga 12 %
Estabilidad	306.00	Estabilidad	321.00	Estabilidad	300.00	CARGA
Lbf	2900.00	Lbf	3050.00	Lbf	2850.00	2633.00
Corrección	2697.00	Corrección	2836.50	Corrección	2365.50	FLUJO
Flujo	15.00	Flujo	16.00	Flujo	16.00	15.67

Nota. Presentación de resultados de estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica patrón. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. Mezcla asfáltica modificada con polibutadieno con porcentajes de 2 %,4 % y 6 %

A continuación, se presenta la descripción de la mezcla asfáltica modificada con polibutadieno con porcentajes de 2 %,4 % y 6 %, además se mencionan las normas que rigen este tipo de ensayos.

3.2.1. Gravedad específica Bulk ASTM D 2726 y ASTM D 1188

Los resultados de gravedad específica Bulk, se realizaron siguiendo los procedimientos indicados según las normas que rigen a este ensayo.

3.2.1.1. Gravedad específica

Los resultados de gravedad específica muestran la variaciones sufridas por las pastillas de mezcla asfáltica modificada con polibutadieno con distintos porcentajes.

Tabla 15.*Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 2 % de polibutadieno*

Modificación con 2 % de polibutadieno	Peso en aire	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gravedad Específica
1 pastilla 8 %	961.39	968.29	479.08	1.965
2 pastilla 8 %	840.29	847.03	431.45	2.022
3 pastilla 8 %	900.84	907.66	455.27	1.991
1 pastilla 9 %	1082.55	1085.81	571.71	2.106
2 pastilla 9 %	1088.50	1093.51	563.53	2.054
3 pastilla 9 %	1085.53	1089.66	567.62	2.079
1 pastilla 10 %	1041.14	1042.95	571.34	2.208
2 pastilla 10 %	1084.76	1086.20	590.72	2.189
3 pastilla 10 %	1062.95	1064.58	581.03	2.198
1 pastilla 11 %	1098.56	1099.82	595.55	2.179
2 pastilla 11 %	1091.11	1094.52	572.18	2.089
3 pastilla 11 %	1094.84	1097.17	583.87	2.133
1 pastilla 12 %	1101.00	1101.76	605.57	2.219
2 pastilla 12 %	1150.65	1152.03	629.63	2.203
3 pastilla 12 %	1125.83	1126.90	617.60	2.211

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 16.

Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 4 % de polibutadieno

Modificación con 4 % de polibutadieno	Peso en aire	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gravedad Específica
1 pastilla 8 %	1083.17	1088.24	539.93	1.975
2 pastilla 8 %	1029.09	1036.77	496.49	1.905
3 pastilla 8 %	1056.13	1062.51	518.21	1.940
1 pastilla 9 %	1100.22	1103.43	551.35	1.993
2 pastilla 9 %	1088.92	1096.16	531.77	1.929
3 pastilla 9 %	1094.57	1099.80	541.56	1.961
1 pastilla 10 %	1116.55	1120.58	562.58	2.001
2 pastilla 10 %	1108.16	1114.27	552.11	1.971
3 pastilla 10 %	1112.36	1117.43	557.35	1.986
1 pastilla 11 %	1098.83	1103.44	562.40	2.031
2 pastilla 11 %	1132.22	1136.48	578.18	2.028
3 pastilla 11 %	1115.53	1119.96	570.29	2.029
1 pastilla 12 %	1120.79	1124.33	577.10	2.048
2 pastilla 12 %	1123.82	1126.05	580.63	2.060
3 pastilla 12 %	1122.31	1125.19	578.87	2.054

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 17.*Gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 6 % de polibutadieno*

Modificación con 6 % polibutadieno	Peso en aire	Peso seco saturado	Peso sumergido	Gravedad Específica
1 pastilla 8 %	1077.32	1082.46	511.37	1.886
2 pastilla 8 %	1023.35	1028.23	490.02	1.901
3 pastilla 8 %	1050.34	1055.35	500.70	1.894
1 pastilla 9 %	1170.56	1174.32	610.52	2.076
2 pastilla 9 %	1102.35	1107.78	537.76	1.934
3 pastilla 9 %	1136.46	1141.05	574.14	2.005
1 pastilla 10 %	1182.01	1184.39	633.54	2.146
2 pastilla 10 %	1195.82	1199.95	632.02	2.106
3 pastilla 10 %	1188.92	1192.17	632.78	2.125
1 pastilla 11 %	1187.85	1187.58	645.73	2.192
2 pastilla 11 %	1048.43	1054.80	515.10	1.943
3 pastilla 11 %	1118.14	1121.19	580.42	2.068
1 pastilla 12 %	1099.00	1101.24	574.51	2.086
2 pastilla 12 %	1098.00	1106.30	576.00	2.071
3 pastilla 12 %	1100.00	1103.56	577.00	2.089

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica en mezcla asfáltica modificada con un 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.1.2. Gravedad específica Bulk promedio

La gravedad específica Bulk promedio no más que el promedio de gravedades específicas de cada punto muestreado, datos obtenidos para cada modificación realizada con polibutadieno.

Tabla 18.*Gravedad específica Bulk, modificada con 2 % de polibutadieno*

Modificación con 2 % de polibutadieno	1 pastilla 8 %	2 pastilla 8 %	3 pastilla 8 %	Gmb promedio
	Gmb 1.9652	Gmb 2.0220	Gmb 1.9913	1.993
	1 pastilla 9 %	2 pastilla 9 %	3 pastilla 9 %	Gmb promedio
	Gmb 2.1057	Gmb 2.0539	Gmb 2.0794	2.080
	1 pastilla 10 %	2 pastilla 10 %	3 pastilla 10 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2076	Gmb 2.1893	Gmb 2.1982	2.198
	1 pastilla 11 %	2 pastilla 11 %	3 pastilla 11 %	Gmb promedio
	Gmb 2.1785	Gmb 2.0889	Gmb 2.1329	2.133
	1 pastilla 12 %	2 pastilla 12 %	3 pastilla 12 %	Gmb promedio
	Gmb 2.2189	Gmb 2.2026	Gmb 2.2106	2.211

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica Bulk promedio para una mezcla asfáltica modificada con un 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 19.*Gravedad específica Bulk, modificada con 4 % de polibutadieno*

Modificación con 4% de polibutadieno	1 pastilla 8 %	2 pastilla 8 %	3 pastilla 8 %	Gmb promedio
	Gmb 1.9755	Gmb 1.9047	Gmb 1.9404	1.940
	1 pastilla 9 %	2 pastilla 9 %	3 pastilla 9 %	Gmb promedio
	Gmb 1.9929	Gmb 1.9294	Gmb 1.9608	1.961
	1 pastilla 10 %	2 pastilla 10 %	3 pastilla 10 %	Gmb promedio
	Gmb 2.0010	Gmb 1.9713	Gmb 1.9861	1.986
	1 pastilla 11 %	2 pastilla 11 %	3 pastilla 11 %	Gmb promedio
	Gmb 2.0310	Gmb 2.0280	Gmb 2.0294	2.029
	1 pastilla 12 %	2 pastilla 12 %	3 pastilla 12 %	Gmb promedio
	Gmb 2.0481	Gmb 2.0605	Gmb 2.0543	2.054

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica Bulk promedio para una mezcla asfáltica modificada con un 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 20.*Gravedad específica Bulk, modificada con 6 % de polibutadieno*

	1 pastilla 8 %	2 pastilla 8 %	3 pastilla 8 %	Gmb promedio
	Gmb 1.8864	Gmb 1.9014	Gmb 1.8937	1.894
	1 pastilla 9 %	2 pastilla 9 %	3 pastilla 9 %	Gmb promedio
	Gmb 2.0762	Gmb 1.9339	Gmb 2.0046	2.005
Modificación con 6 % de polibutadieno	1 pastilla 10 %	2 pastilla 10 %	3 pastilla 10 %	Gmb promedio
	Gmb 2.1458	Gmb 2.1056	Gmb 2.1254	2.126
	1 pastilla 11 %	2 pastilla 11 %	3 pastilla 11 %	Gmb promedio
	Gmb 2.1922	Gmb 1.9426	Gmb 2.0677	2.067
	1 pastilla 12 %	2 pastilla 12 %	3 pastilla 12 %	Gmb promedio
	Gmb 2.0865	Gmb 2.1580	Gmb 2.090	2.111

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica Bulk promedio para una mezcla asfáltica modificada con un 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.2. Gravedad teórica máxima Rice ASTM D 2041 y AASHTO T 209

Los resultados de gravedad teórica máxima Rice muestra el porcentaje de vacíos presentes en cada una de las mezclas modificadas con polibutadieno.

Tabla 21.*Gravedad específica teórica máxima, modificada con 2 % de polibutadieno*

Tipo de pastilla	% de bitumen en la mezcla	Peso seco de muestra (A)	Peso de picnómetro+ agua (G)	Peso de picnómetro + material +agua (G)	Gravedad específica teórica máxima
Modificación con 2% de polibutadieno	8 %	954.80	7380.50	7911.00	2.250
	9 %	1073.50	7380.50	7984.30	2.286
	10 %	1030.10	7377.10	7957.90	2.293
	11 %	1096.60	7377.10	7984.00	2.239
	12 %	1092.50	7377.10	7985.90	2.259

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica teórica máxima para mezcla asfáltica modificada con un 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 22.*Gravedad específica teórica máxima, modificada con 4 % de polibutadieno*

Tipo de pastilla	% de bitumen en la mezcla	Peso seco de muestra (A)	Peso de picnómetro+ agua (G)	Peso de picnómetro + material +agua (G)	Gravedad específica teórica máxima
Modificación con 4% de polibutadieno	8 %	1065.00	7379.00	7973.10	2.262
	9 %	1090.80	7379.00	7973.10	2.196
	10 %	1111.20	7375.50	7990.50	2.239
	11 %	1089.70	7375.50	7974.10	2.219
	12 %	1109.80	7375.50	7981.30	2.202

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica teórica máxima para mezcla asfáltica modificada con un 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 23.*Gravedad específica teórica máxima, modificada con 6 % de polibutadieno*

Tipo de pastilla	% de bitumen en la mezcla	Peso seco de muestra (A)	Peso de picnómetro+ agua (G)	Peso de picnómetro + material + agua (G)	Gravedad específica teórica máxima
Modificación con 6% de polibutadieno	8 %	1065.10	7380.50	7972.10	2.249
	9 %	1157.90	7380.50	8031.20	2.283
	10 %	1177.75	7380.30	8036.00	2.256
	11 %	1173.00	7380.30	8030.20	2.242
	12 %	1088.80	7380.30	7962.30	2.148

Nota. Presentación de resultados de gravedad específica teórica máxima para mezcla asfáltica modificada con un 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.3. Porcentaje de vacíos – densidad ASTM D 2303 y AASHTO T 269

Los resultados obtenidos por la relación de porcentaje de vacíos-densidad garantizan que los rangos de la vacíos en las mezclas asfálticas modificadas con polibutadieno cumplan con las condiciones de relaciones volumétricas para tener un buen control de calidad.

Tabla 24.*% de vacíos en mezcla asfáltica modificada con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno*

Tipo de pastilla	% de Bitumen en Mezcla	Gravedad específica Bulk	Gravedad específica teórica máxima	Porcentaje de vacíos %
Modificación con 2 % de polibutadieno	8	1.993	2.250	11.442
	9	2.080	2.286	9.007
	10	2.198	2.293	4.112
	11	2.133	2.239	4.729
	12	2.211	2.259	2.122
Modificación con 4 % de polibutadieno	8	1.940	2.262	14.213
	9	1.961	2.196	10.705
	10	1.986	2.239	11.312
	11	2.029	2.219	8.537
	12	2.054	2.202	6.707
Modificación con 6 % de polibutadieno	8	1.894	2.249	15.808
	9	2.005	2.283	12.178
	10	2.126	2.256	5.781
	11	2.067	2.242	7.800
	12	2.111	2.148	1.717

Nota. Presentación de resultados de porcentaje de vacíos en mezcla asfáltica modificada con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.4. Estabilidad – flujo Marshall ASTM D 1559 y AASHTO T245

La estabilidad y flujo Marshall indicaran la resistencia (estabilidad) y la deformación (flujo) que sufren las pastillas de la mezcla asfáltica modificada con polibutadieno en porcentajes de 2 %,4 % y 6 %.

Tabla 25.*Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 2 % de polibutadieno*

1 pastilla 8 %		2 pastilla 8 %		3 pastilla 8 %		Promedio carga 8 %
Estabilidad	114.00	Estabilidad	77.00	Estabilidad	96.00	Carga
Lbf	1100.00	Lbf	740.00	Lbf	920.00	1071.87
Corrección	1144.00	Corrección	976.80	Corrección	1094.80	Flujo
Flujo	27.00	Flujo	27.00	Flujo	27.00	27.00
1 pastilla 9 %		2 pastilla 9 %		3 pastilla 9 %		Promedio carga 9 %
Estabilidad	170.00	Estabilidad	174.00	Estabilidad	172	Carga
Lbf	1650.00	Lbf	1700.00	Lbf	1700	1638.00
Corrección	1650.00	Corrección	1632.00	Corrección	1632	Flujo
Flujo	25.00	Flujo	25.00	Flujo	25	25.00
1 pastilla 10 %		2 pastilla 10 %		3 pastilla 10 %		Promedio carga 10 %
Estabilidad	176.00	Estabilidad	215.00	Estabilidad	196.00	Carga
Lbf	1700.00	Lbf	2050.00	Lbf	1900.00	1395.33
Corrección	1853.00	Corrección	2132.00	Corrección	201.00	Flujo
Flujo	25.00	Flujo	23.00	Flujo	24.00	24.00
1 pastilla 11 %		2 pastilla 11 %		3 pastilla 11 %		Promedio carga 11 %
Estabilidad	185.00	Estabilidad	161.00	Estabilidad	173.00	Carga
Lbf	1800.00	Lbf	1550.00	Lbf	1650.00	1600.00
Corrección	1728.00	Corrección	1488.00	Corrección	1584.00	Flujo
Flujo	25.00	Flujo	26.00	Flujo	26.00	25.67
1 pastilla 12 %		2 pastilla 12 %		3 pastilla 12 %		Promedio carga 12 %
Estabilidad	140.00	Estabilidad	171.00	Estabilidad	156.00	Carga
Lbf	1350.00	Lbf	1650.00	Lbf	1500.00	1494.67
Corrección	1404.00	Corrección	1580.00	Corrección	1500.00	Flujo
Flujo	22.00	Flujo	22.00	Flujo	22.00	22.00

Nota. Presentación de resultados de estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica modificada con 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 26.*Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 4 % de polibutadieno*

1 pastilla 8 %		2 pastilla 8 %		3 pastilla 8 %		Promedio carga 8 %
Estabilidad	155.00	Estabilidad	116.00	Estabilidad	136.00	Carga
Lbf	1500.00	Lbf	1100.00	Lbf	1300.00	1071.67
Corrección	1245.00	Corrección	891.00	Corrección	1079.00	Flujo
Flujo	30.00	Flujo	35.00	Flujo	22.00	29.00
1 pastilla 9 %		2 pastilla 9 %		3 pastilla 9 %		Promedio carga 9 %
Estabilidad	176.00	Estabilidad	125.00	Estabilidad	151.00	Carga
Lbf	1700.00	Lbf	1200.00	Lbf	1450.00	1200.50
Corrección	1462.00	Corrección	936.00	Corrección	1203.50	Flujo
Flujo	33.00	Flujo	35.00	Flujo	34.00	34.00
1 pastilla 10 %		2 pastilla 10 %		3 pastilla 10 %		Promedio carga 10 %
Estabilidad	171.00	Estabilidad	140.00	Estabilidad	156.00	Carga
Lbf	1650.00	Lbf	1350.00	Lbf	1500.00	1226.00
Corrección	1369.50	Corrección	1093.50	Corrección	1215.00	Flujo
Flujo	35.00	Flujo	40.00	Flujo	38.00	37.67
1 pastilla 11 %		2 pastilla 11 %		3 pastilla 11 %		Promedio carga 11 %
Estabilidad	155.00	Estabilidad	171.00	Estabilidad	163.00	Carga
Lbf	1500.00	Lbf	1650.00	Lbf	1550.00	1304.33
Corrección	1290.00	Corrección	1336.50	Corrección	1286.50	Flujo
Flujo	39.00	Flujo	40.00	Flujo	40.00	39.67
1 pastilla 12 %		2 pastilla 12 %		3 pastilla 12 %		Promedio carga 12 %
Estabilidad	175.00	Estabilidad	184.00	Estabilidad	180.00	Carga
Lbf	1650.00	Lbf	1750.00	Lbf	1700.00	1428.50
Corrección	1369.50	Corrección	1505.00	Corrección	1411.00	Flujo
Flujo	38.00	Flujo	38.00	Flujo	38.00	38.00

Nota. Presentación de resultados de estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica modificada con 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 27.*Estabilidad y flujo Marshall, modificada con 6 % de polibutadieno*

1 pastilla 8 %		2 pastilla 8 %		3 pastilla 8 %		Promedio carga 8 %
Estabilidad	188.00	Estabilidad	138.00	Estabilidad	163.00	Carga
Lbf	1800.00	Lbf	1300.00	Lbf	1550.00	1197.00
Corrección	1368.00	Corrección	1014.00	Corrección	1209.00	Flujo
Flujo	37.00	Flujo	33.00	Flujo	35.00	35.00
1 pastilla 9 %		2 pastilla 9 %		3 pastilla 9 %		Promedio carga 9 %
Estabilidad	178.00	Estabilidad	159.00	Estabilidad	169.00	Carga
Lbf	1700.00	Lbf	1500.00	Lbf	1600.00	1292.33
Corrección	1411.00	Corrección	1170.00	Corrección	1296.00	Flujo
Flujo	30.00	Flujo	40.00	Flujo	35.00	35.00
1 pastilla 10 %		2 pastilla 10 %		3 pastilla 10 %		Promedio carga 10 %
Estabilidad	187.00	Estabilidad	214.00	Estabilidad	201.00	Carga
Lbf	1800.00	Lbf	2050.00	Lbf	1900.00	1544.00
Corrección	1494.00	Corrección	1599.00	Corrección	1539.00	Flujo
Flujo	27.00	Flujo	30.00	Flujo	29.00	28.67
1 pastilla 11 %		2 pastilla 11 %		3 pastilla 11 %		Promedio carga 11 %
Estabilidad	209.00	Estabilidad	137.00	Estabilidad	173.000	Carga
Lbf	2000.00	Lbf	1300.00	Lbf	1650.000	1314.50
Corrección	1560.00	Corrección	1014.00	Corrección	1369.500	Flujo
Flujo	25.00	Flujo	45.00	Flujo	35.000	35.00
1 pastilla 12 %		2 pastilla 12 %		3 pastilla 12 %		Promedio carga 12 %
Estabilidad	169	Estabilidad	180	Estabilidad	168	Carga
Lbf	1600	Lbf	1700	Lbf	1600	1355.67
Corrección	1328	Corrección	1411	Corrección	1328	Flujo
Flujo	35	Flujo	33	Flujo	35	35

Nota. Presentación de resultados de estabilidad y flujo Marshall en muestra asfáltica modificada con 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3. Gráfico de resistencia a la compresión directa sobre asfalto convencional

El gráfico de resistencia del asfalto convencional a la compresión directa es un factor crucial en la determinación de su rendimiento y vida útil.

El asfalto es un material de uso común en la construcción de carreteras y autopistas debido a su durabilidad y rentabilidad. Sin embargo, la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa es un factor crucial para determinar su rendimiento y vida útil. En este ensayo, exploraremos los factores que afectan la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa, los métodos experimentales utilizados para medir esta resistencia y las estrategias para mejorar la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa.

La resistencia del asfalto convencional a la compresión directa está influenciada por varios factores, que incluyen la composición de la mezcla asfáltica, la temperatura y el envejecimiento, y la tasa de carga y la duración de la prueba de compresión. El aglutinante, el agregado y los aditivos utilizados en la mezcla asfáltica pueden afectar significativamente su resistencia a la compresión. La rigidez y resistencia del aglomerante, la gradación y forma del agregado, y el tipo y cantidad de aditivos juegan un papel crucial en la determinación de la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa.

La temperatura y el envejecimiento también afectan la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. A medida que el asfalto envejece, se vuelve más rígido y quebradizo, lo que reduce su capacidad para resistir la compresión. La tasa de carga y la duración de la prueba de compresión también pueden afectar la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. Una mayor tasa de carga o una mayor duración de la prueba de compresión

pueden resultar en una mayor deformación y una menor resistencia a la compresión.

Se utilizan varios métodos experimentales para medir la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. La prueba de Marshall es un método común utilizado para determinar la resistencia del asfalto a la compresión. Esta prueba consiste en compactar una muestra cilíndrica de asfalto y someterla a una carga hasta que falle. La carga máxima sostenida por el espécimen se usa para calcular la estabilidad y el flujo de Marshall. El ensayo de resistencia a la tracción indirecta es otro método utilizado para medir la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa.

Esta prueba consiste en aplicar una carga de tracción a una muestra cilíndrica de asfalto hasta que falla. La carga máxima sostenida por el espécimen se usa para calcular la resistencia a la tracción indirecta. El ensayo de compresión uniaxial es un método más avanzado que se utiliza para medir la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. Esta prueba consiste en someter una muestra cilíndrica de asfalto a una carga de compresión uniaxial hasta que falla. La carga máxima sostenida por la probeta se utiliza para calcular la resistencia a la compresión y las propiedades de deformación del asfalto.

Se pueden emplear varias estrategias para mejorar la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. El uso de ligantes asfálticos modificados con mayor rigidez y mejor resistencia a la deformación puede mejorar significativamente la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. La selección y gradación óptimas de los agregados también pueden mejorar la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. La adición de rellenos y fibras a la mezcla asfáltica también puede mejorar la resistencia del asfalto convencional a la compresión directa. Los rellenos como la cal hidratada

o las cenizas volantes pueden mejorar la rigidez y resistencia del asfalto, mientras que las fibras como la celulosa o el poliéster pueden mejorar la resistencia a la deformación.

3.3.1. Gráfico de resistencia a compresión directa sobre mezcla patrón

La grafica de compresión directa sobre la mezcla asfáltica patrón se obtuvo gráficamente mediante el ploteo de los datos obtenidos en la tabla 28.

Tabla 28.

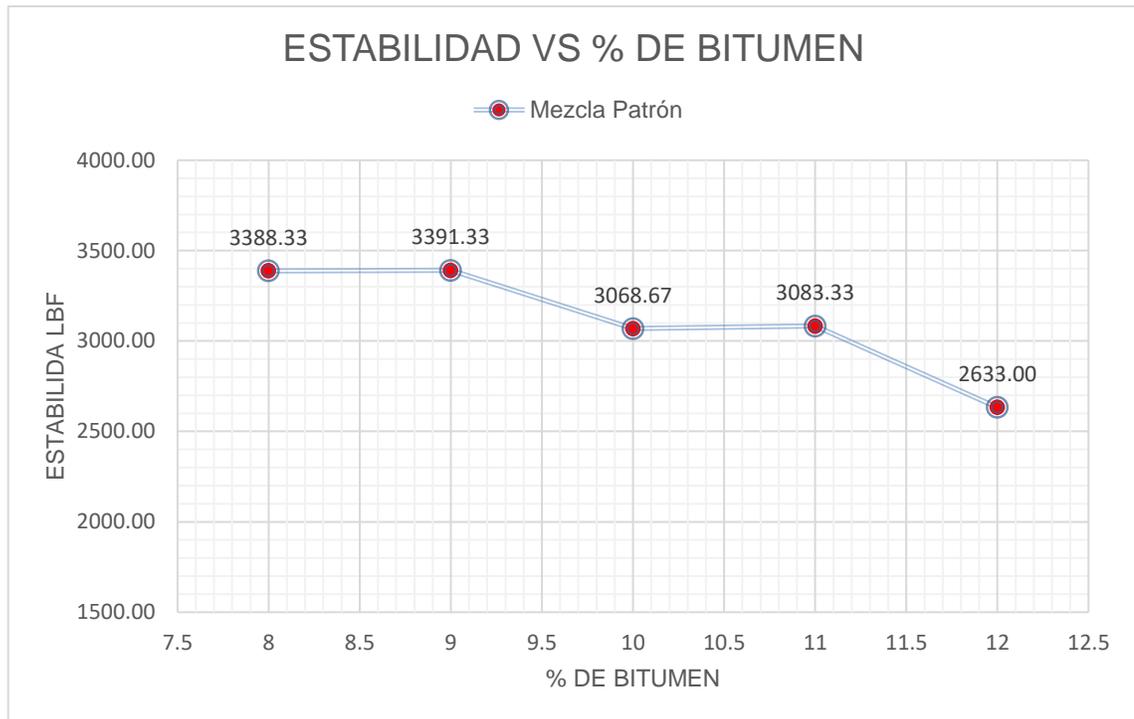
Resultados de estabilidad Marshall en muestra patrón

Pastilla	% de bitumen	Flujo 0.01"	ESTABILIDAD (lbf)
Patrón	8	12.00	3388.33
	9	11.67	3391.33
	10	14.67	3068.67
	11	15.00	3083.33
	12	15.67	2633.00

Nota. Presentación de resultados de estabilidad Marshall en muestra patrón. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 29.

Estabilidad vs. % de Bitumen en mezcla patrón



Nota. Presentación de gráfica de resultados de estabilidad vs., porcentaje de Bitumen en mezcla patrón Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3.2. Gráfico de resistencia a la compresión directa sobre asfalto modificado con polibutadieno

El Gráfico de resistencia a compresión directa sobre asfalto modificado con polibutadieno modificado con porcentajes de 2 %,4 % y 6 % se obtuvo mediante el ploteo de los datos obtenidos en la tabla 29.

Tabla 29.

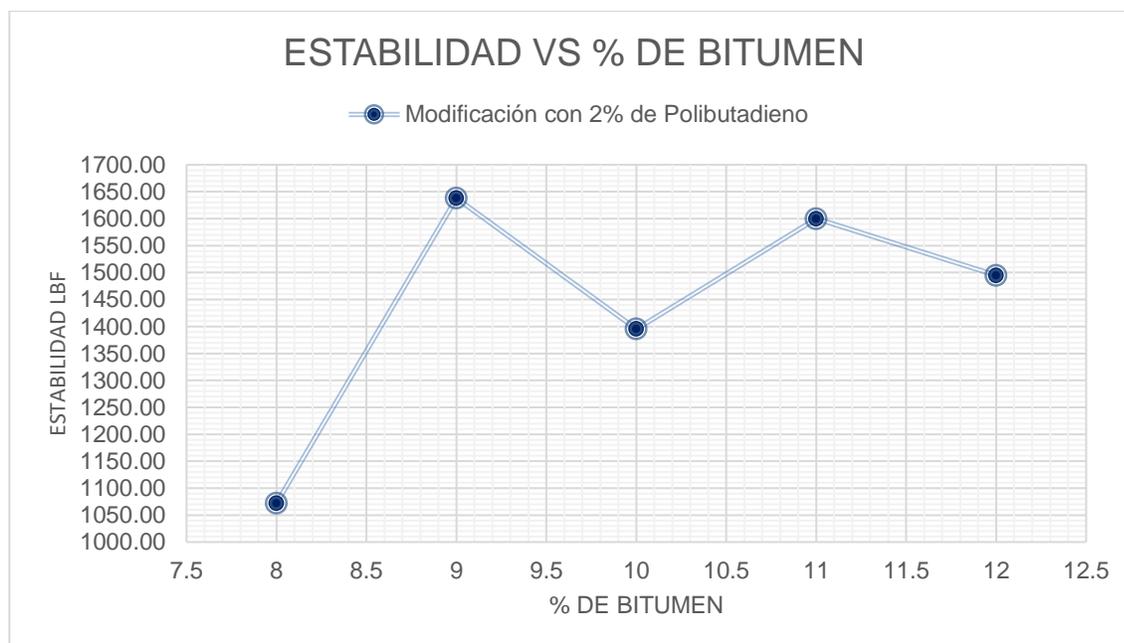
Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 2 % de polibutadieno

Pastilla	% de bitumen	Flujo 0.01"	Estabilidad (lbf)
Modificación con 2 % de polibutadieno	8	27.00	1071.87
	9	25.00	1638.00
	10	24.00	1395.33
	11	25.67	1600.00
	12	22.00	1494.67

Nota. Presentación de resultados de estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 30.

Estabilidad vs. % de bitumen con 2 % de polibutadieno



Nota. Presentación de gráfica de resultados de estabilidad vs., porcentaje de Bitumen en mezcla asfáltica modificada con 2 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 30.

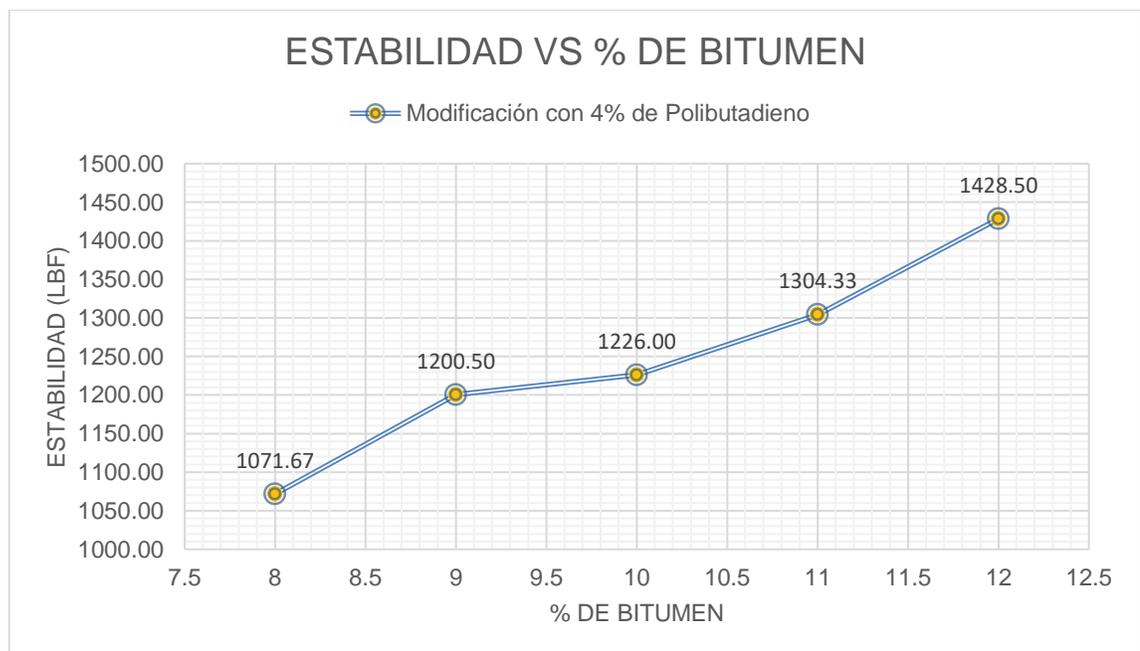
Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 4 % de polibutadieno

Pastilla	% de bitumen	Flujo 0.01"	Estabilidad (lbf)
Modificación con 4 % de polibutadieno	8	29.00	1071.67
	9	34.00	1200.50
	10	37.67	1226.00
	11	39.67	1304.33
	12	38.00	1428.50

Nota. Presentación de resultados de estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 31.

Estabilidad vs. % de bitumen con 4 % de polibutadieno



Nota. Presentación de gráfica de resultados de estabilidad vs., porcentaje de Bitumen en mezcla asfáltica modificada con 4 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 31.

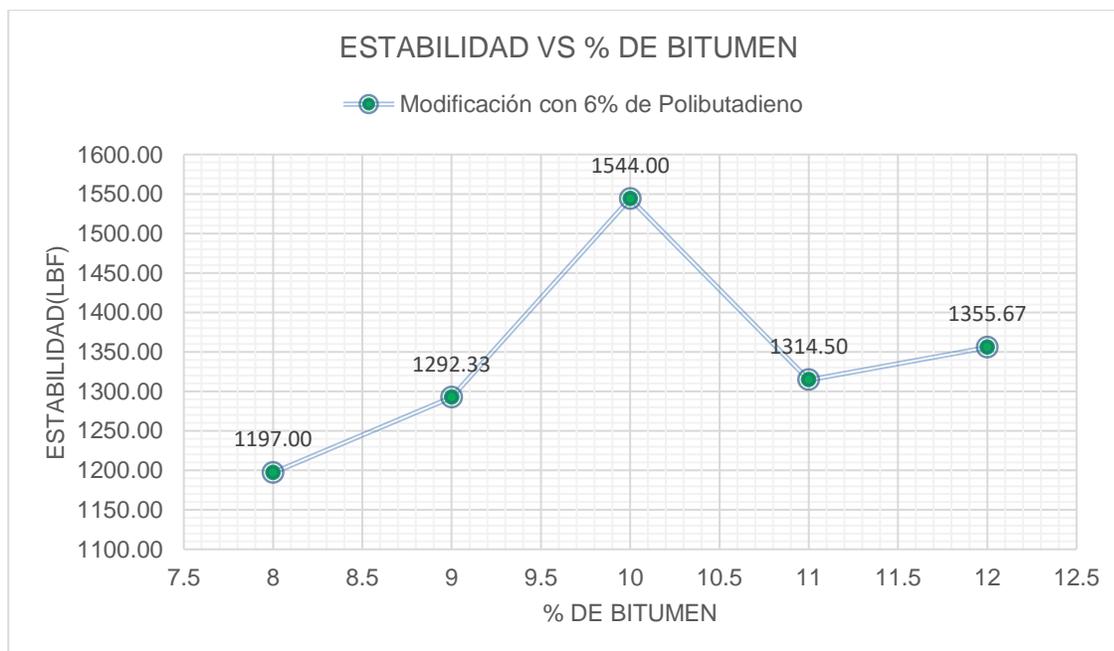
Estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 6 % de polibutadieno

Pastilla	% de bitumen	Flujo 0.01"	Estabilidad (lbf)
Modificación con 6 % de polibutadieno	8	35.00	1197.00
	9	35.00	1292.33
	10	28.67	1544.00
	11	35.00	1314.50
	12	35.00	1355.67

Nota. Presentación de resultados de estabilidad Marshall para mezcla asfáltica modificada con 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 32.

Estabilidad vs. % de bitumen con 6% de polibutadieno



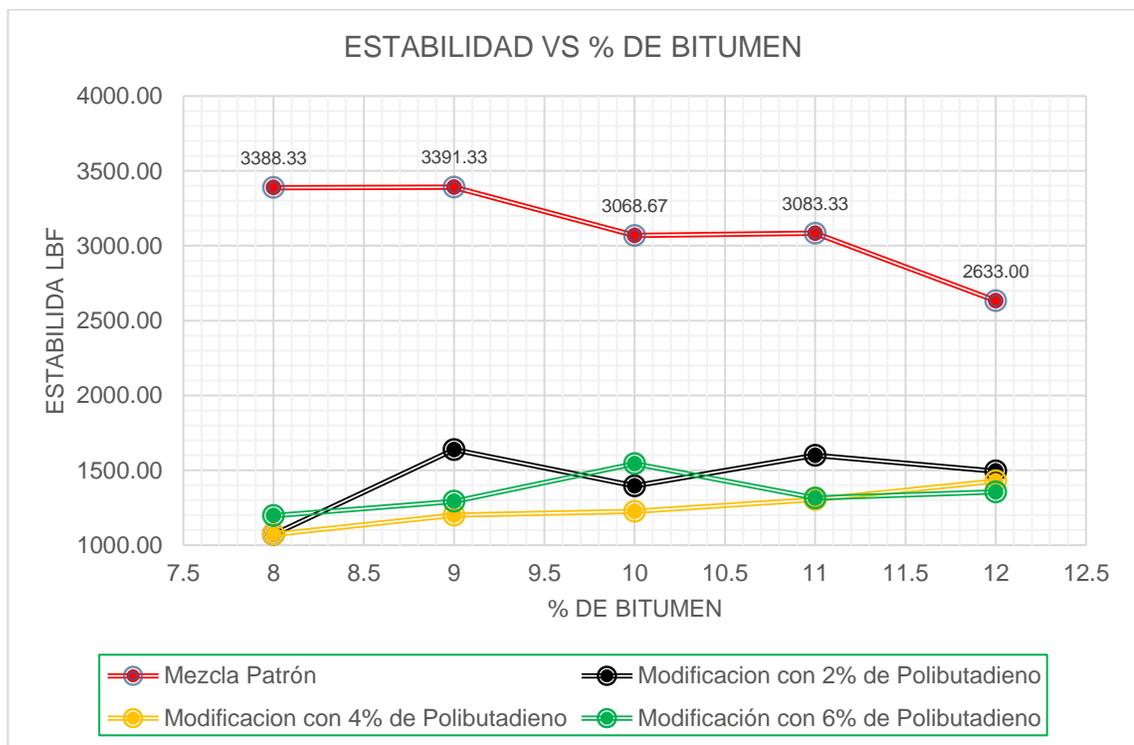
Nota. Presentación de gráfica de resultados de estabilidad vs., porcentaje de Bitumen en mezcla asfáltica modificada con 6 % de polibutadieno. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3.3. Gráfico de resistencia de compresión directa en mezcla patrón vs asfalto modificado con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno

Este gráfico muestra las variaciones existentes entre una asfalto normal y un asfalto modificado con polibutadieno en diferentes porcentajes

Figura 33.

Estabilidad vs % de bitumen



Nota. Presentación de gráfica de resultados de estabilidad vs., porcentaje de bitumen. Elaboración propia, realizado con Excel.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Verificación de cumplimiento de parámetros de diseño utilizados en mezcla patrón y mezcla modificada

Según las especificaciones proporcionadas por la dirección general de caminos, se establecen criterios de diseño para las mezclas asfálticas, los cuales incluyen una estabilidad mínima de 1200 lbf y un rango de flujo entre 8 y 16. En este contexto, la muestra patrón ha demostrado cumplir con éxito todos estos criterios en los 5 puntos muestreados, lo que indica que cumple con los estándares de calidad requeridos.

Es importante resaltar que, aunque los criterios de diseño se encuentren dentro del rango permitido, se ha observado que, al aumentar la cantidad de betún en la mezcla, las características físico-mecánicas tienden a disminuir. Esto implica que es crucial mantener un equilibrio adecuado en la composición de la mezcla para garantizar su resistencia y durabilidad.

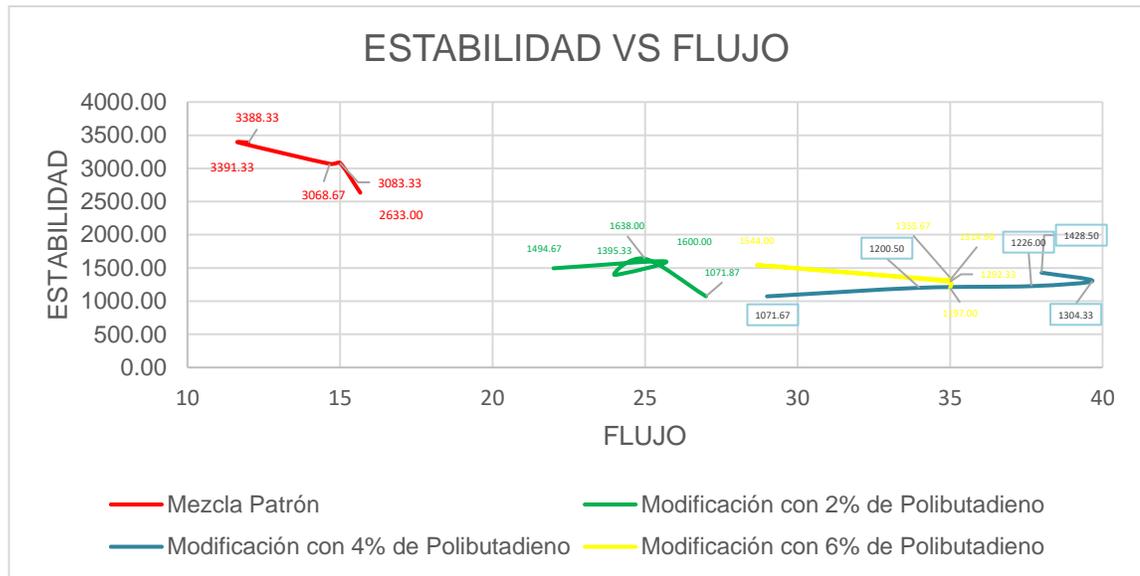
En cuanto a las modificaciones realizadas con polibutadieno, se han obtenido resultados variados. Se ha observado que dichas modificaciones han tenido un impacto significativo en la estabilidad de la mezcla, y los valores de fluencia han superado ampliamente el criterio de diseño establecido por la dirección general de caminos. Estos hallazgos indican que es necesario realizar ajustes adicionales para lograr un equilibrio óptimo entre las propiedades físico-mecánicas y los requisitos de diseño establecidos.

4.1.1. Gráfico comparativo de resistencia de compresión directa en mezcla patrón vs asfalto modificado con 2 %, 4 % y 6 % de polibutadieno, ambas mezclas utilizando bitumen A-30 como ligante asfáltico

Las modificaciones realizadas con polibutadieno dieron resultados variados ya que hubo muchos cambios en la estabilidad y los valores de fluencia estaban muy por encima del criterio de diseño que proporciona la dirección general de caminos. El tamaño de grano de polibutadieno triturado jugó un papel importante en los cambios físico-mecánicos ya que conforme se aumentaba el porcentaje en la mezcla la compactación tendía a ser menor, factor que afectaba directamente los resultados de estabilidad y flujo generando aumentos o disminución en los mismos. La figura 34 muestra los resultados obtenidos y las variaciones que sufrieron tanto mezcla patrón como las mezclas modificadas con polibutadieno en porcentajes de 2 %, 4 % y 6 %.

Figura 34.

Gráfico comparativo de estabilidad vs. flujo



Nota. Presentación de gráfica comparativa resultados de estabilidad vs. flujo. Elaboración propia, realizado con Excel.

CONCLUSIONES

1. Se realizaron ensayos de compresión y flexión en mezclas asfálticas con diferentes porcentajes de adición de Polibutadieno (2 %, 4 % y 6 %). Los resultados mostraron que la presencia de Polibutadieno afectó sus propiedades físico-mecánica como también la resistencia a la compresión y flexión de la mezcla asfáltica.
2. Se observó que la adición de Polibutadieno tuvo un impacto negativo en las propiedades físico-mecánicas de la mezcla asfáltica. El aumento en el porcentaje de Polibutadieno resultó afectando la resistencia y durabilidad de la mezcla, así como en su capacidad para soportar cargas y deformaciones.
3. El porcentaje óptimo de adición de Polibutadieno debe ser menor al utilizado en esta investigación debido a que un aumento en dicho porcentaje altera las propiedades físicoquímicas de la mezcla asfáltica, comprometiendo su desempeño a largo plazo. Es importante encontrar un equilibrio para mejorar las propiedades mecánicas y mantener las propiedades físicoquímicas de la mezcla asfáltica.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar un porcentaje de adición de Polibutadieno menor al 2 % en las mezclas asfálticas para evitar afectar negativamente las propiedades físico-mecánicas y la resistencia a la compresión y flexión.
2. Evaluar cuidadosamente el porcentaje de adición de Polibutadieno en las mezclas asfálticas, evitando aumentos significativos que puedan comprometer la resistencia, durabilidad y capacidad de carga de la mezcla.
3. Lograr un equilibrio adecuado entre la mezcla asfáltica y el polibutadieno para mejorar las propiedades mecánicas y mantener las propiedades fisicoquímicas. Es importante tener en cuenta que la adición de polibutadieno a la mezcla debe ser menor al 1 % y con un diámetro inferior a 1 mm.

REFERENCIAS

- Álvarez, J. (2017). *Azúcar como aditivo retardante y modificador de resistencia para mezclas de concreto*. [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6681/1/Julio%20C%C3%A9sar%20Alvarez%20Guill%C3%A9n.pdf>
- Constructor Civil. (22 de enero de 2011). *Aditivos acelerantes*. Constructor Civil. <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/aditivos-acelerantes.html>
- Dirección General de Caminos. (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. MICIVI.
- Dominguez, E. (13 de octubre de 2015). *Estado del concreto*. SlideShare. <https://es.slideshare.net/EdsonDominguezYupanqui/estados-del-concreto>
- Gardencenterejea. (2023). *¿Qué es el tejado SBS?* Gardencenterejea.com. <https://gardencenterejea.com/accesorios-casetas-de-madera/8376-sbs-caucho-sintetico.html>
- Gomez, E. (16 de mayo de 2012). *Unidad 4: Concreto endurecido*. Academia. https://www.academia.edu/5229994/UNIDAD_4_CONCRETO_ENDURECIDO

Méndez, E. (2020). *México con gran potencial para cultivar hule natural para insumos contra Covid-19*. EXCELSIOR.
<https://www.excelsior.com.mx/nacional/mexico-con-gran-potencial-para-cultivar-hule-natural-para-insumos-contra-covid-19/1422601>

Mexpolimeros. (30 de marzo de 2023). *Polibutadieno (BR)*. Mexpolimero.
<https://www.mexpolimeros.com/polibutadieno.html>

Singh, M. (10 de marzo de 2015). *Polibutadieno*. Prezi.
<https://prezi.com/h6cl3zd1hf-v/polibutadieno/>

Navarro, J. (2018). *Definición de latex*. D.ABC.
<https://www.definicionabc.com/general/latex.php>

Química Miralles. (2023). *Caucho sintético*. Grupo Hevea.
<https://www.quimicamiralles.cl/index.php/productos/cauchos/cauchos-sinteticos-1/estireno-butadieno/caucho-sbr-arpol-1712>

Roberts, R. (5 de julio de 2017). *Analizando la integridad del asfalto*. MCCOPA.
<https://www.carreteras-pa.com/reportajes/analizando-la-integridad-del-asfalto/>

Textos Científicos. (s.f.). *ABS*. Textos Científicos.com.
<https://www.textoscientificos.com/polimeros/abs>

Trigosa. (2022). *Características de las planchas de caucho*. Trigosa.
<https://trigosa.com/productos/plancha-caucho/planchas-de-caucho/>

Sahuquillo, Ó. (2023). *Materiales poliméricos y compuestos*. UPV.
https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/fcm15_5.html

