



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

**MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON LA
REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS
INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL**

Daniel Ekxe Pineda Cardona

Asesorado por el Ing. José Juan Istupe Ibañez

Guatemala, febrero de 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON LA
REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS
INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

DANIEL EKXE PINEDA CARDONA
ASESORADO POR EL ING. JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, FEBRERO DE 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton De León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. José Estuardo Galindo Escobar
EXAMINADOR	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
EXAMINADORA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López
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:

MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON LA REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería CIVIL,
con fecha 5 de noviembre de 2019.

Daniel Ekxe Pineda Cardona

Guatemala 19 de Septiembre de 2023

Ing. Armando Fuentes Roca
Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de ingeniería
Escuela de ingeniería Civil

Ingeniero Fuentes:

Al saludarle cordialmente, me dirijo a su persona para informarle que ha sido concluido satisfactoriamente el trabajo de graduación titulado: **"MODIFICACIÓN DE MESCLAZ ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE PROLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL"**, elaborado por el estudiante Daniel Ekxe Pineda Cardona con carné 201513690, tema para el cual fui asignado como asesor.

Al haber concluido este trabajo y habiendo efectuado la revisión final, manifiesto a usted que dicho trabajo de graduación cumple con los requerimientos establecidos para su desarrollo y proporciona una herramienta valiosa para la comunidad estudiantil, por lo cual recomiendo su aprobación.

Atentamente,


José Juan Istupe Ibañez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 16089
Acta 008/2017-2019 de fecha 15-12-2017
José Juan Istupe Ibañez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 16089
ASESOR

Guatemala, 4 de octubre de 2,023

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 **“MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFALTICAS EN CALIENTE CON LA REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL”** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil, **Daniel Ekxe Pineda Cardona**, quién contó con la asesoría del Ing. José Juan Istupe Ibañez .

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.06.EIC.2024

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: **MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON LA REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL**, presentado por: **Daniel Ekxe Pineda Cardona**, 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, febrero de 2024



LNG.DECANATO.OI.046.2024

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: **MODIFICACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON LA REUTILIZACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO PROVENIENTE DE SACOS INDUSTRIALES, MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL**, presentado por: **Daniel Ekxe Pineda Cardona**, 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, febrero de 2024

JFGR/gaac

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su amor incondicional y darme muchas bendiciones; quien además nunca falla y quien me ha dado la oportunidad de lograr toda meta que me he propuesto en la vida.
- Mi madre** Delmy Cardona, por apoyarme en cada momento con su esfuerzo y sacrificio; por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su gran amor.
- Mi padre y abuela** Moris Pineda y Amparo Castellanos, que a pesar de que dejaron físicamente este mundo, siempre los llevo conmigo, sé que este momento hubiera sido especial para ellos como lo es para mí.
- Mi hermano** Moris Pineda, por ser el apoyo incondicional de mi vida y ejemplo a seguir.
- Mi familia** En general, por estar siempre pendientes de mí y ser apoyo constante e incondicional a lo largo de mis estudios.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi <i>alma máter</i> , por brindarme la educación, y darme valores con sentido social.
Facultad de Ingeniería	Por darme la oportunidad de desarrollarme académicamente y formarme como profesional de la ingeniería.
Mi novia	Silvia Expósito y familia, por brindarme apoyo, motivación y consejos en el desarrollo de mi carrera.
Depto. de Técnica Complementaria	Por haberme dado la oportunidad de desempeñarme como auxiliar de cátedra. En especial al Arq. Alberto Ortiz y Allen Ramírez, con quien trabajé, y a mis compañeros de trabajo por haberme brindado su apoyo y su buena amistad.
Mi asesor	Ing. José Istupe, por brindarme asesoría y apoyo en el desarrollo de mi trabajo de graduación.
Proequipos S.A.	Por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de graduación, en especial a Pablo Cox y Edwin Rodríguez, por su valioso tiempo y apoyo en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Pavimento de carreteras.....	1
1.1.1. Tipos de pavimentos.....	1
1.2. Mezclas asfálticas en caliente	2
1.3. Agregados pétreos.....	3
1.4. Ligantes asfálticos	4
1.4.1. Tipos de ligante asfáltico	5
1.5. Revestimientos asfálticos	6
1.6. Agrietamiento por fatiga.....	8
1.7. Agrietamiento por temperatura	8
1.8. Mezclas asfálticas modificadas	8
1.9. Mezclas asfálticas con adiciones de polímeros.....	12
1.10. Polipropileno	15
1.10.1. Definición	16
1.10.2. Degradación y reciclaje del polipropileno PP	16
1.10.3. Propiedades del polipropileno PP	16
1.10.4. Preparación de polipropileno para mezclas asfálticas.....	18

2.	CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA.....	19
2.1.	Contenido de bitumen (cemento asfáltico)	19
2.2.	Resistencia a la deformación.....	22
2.3.	Resistencia a la fatiga.....	22
2.4.	Resistencia al agrietamiento por temperatura.....	23
2.5.	Durabilidad.....	24
2.6.	Trabajabilidad	25
2.7.	Resistencia a la humedad	26
3.	METODOLOGÍA	29
3.1.	Fibras de polipropileno	29
3.1.1.	Selección de tipo de fibra	31
3.1.2.	Proceso de extracción de la fibra	32
3.1.3.	Tamaño nominal de las fibras	33
3.2.	Prueba de penetración del bitumen asfáltico (AASHTO T- 49, ASTM D-5)	33
3.2.1.	Procedimiento.....	34
3.2.2.	Análisis de resultados.....	35
3.2.3.	Conclusiones	36
3.3.	Prueba de ablandamiento del bitumen (AASHTO T-53)	36
3.3.1.	Procedimiento.....	37
3.3.2.	Análisis de resultados.....	38
3.3.3.	Conclusiones	39
3.4.	Ensayo de granulometría de los agregados sin asfalto (AASHTO T-11, T-27).....	39
3.4.1.	Procedimiento.....	40
3.4.2.	Análisis de resultado.....	44
3.4.3.	Conclusiones	44

3.5.	Ensayo de gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente (Método RICE, AASHTO T- 209, ASTM D-2041)	45
3.5.1.	Procedimiento	45
3.5.2.	Análisis de resultado.....	50
3.5.3.	Conclusiones	51
3.6.	Gravedad específica del concreto asfáltico compactado (Método Bulk, AASHTO T 166-05)	51
3.6.1.	Procedimiento	51
3.6.2.	Cálculos	58
3.6.3.	Análisis de resultado.....	61
3.6.4.	Conclusiones	61
3.7.	Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall (AASHTO T-245, ASTM D-6927)	62
3.7.1.	Procedimiento	62
3.7.2.	Cálculos	66
3.7.3.	Análisis de resultado.....	68
3.7.4.	Conclusiones	69
4.	DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL.....	71
4.1.	Muestreo en banco de materiales	72
4.2.	Identificación de materiales según tipo de mezcla a diseñar ...	73
4.3.	Características de los agregados	75
4.4.	Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO T-11)	76
4.5.	Combinación granulométrica de los agregados	83
4.6.	Porcentajes óptimo de asfalto presente en la mezcla de diseño.....	85

4.7.	Porcentajes teóricos de polipropileno presente en la mezcla de diseño	85
4.8.	Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica	86
4.9.	Maquinaria y equipo	88
4.10.	Descripción de la metodología para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica	93
4.11.	Procedimiento para elaboración de la mezcla asfáltica	96
4.12.	Elaboración de las briquetas Marshall.....	99
5.	ENSAYOS Y RESULTADOS DE LAS BRIQUETAS SEGÚN PUNTO DE DOSIFICACIÓN	103
5.1.	Gravedad específica de la mezcla compactada (Bulk) para cálculo de vacíos	103
5.2.	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla compactada (Rice) para cálculo de vacíos.....	106
5.3.	Porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas en caliente compactadas.....	108
5.4.	Estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall.....	116
5.5.	Resultados	119
5.6.	Análisis de los resultados	123
	CONCLUSIONES.....	127
	RECOMENDACIONES	129
	REFERENCIAS	131
	ANEXOS.....	133

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Clasificación de los polímeros	13
Figura 2.	Sacos provenientes de desechos industriales	31
Figura 3.	Extracción de fibras provenientes de sacos industriales	32
Figura 4.	Resultado final de las fibras provenientes de sacos industriale ...	33
Figura 5.	Lavado del agregado.....	42
Figura 6.	Agregado listo para ser tamizado	43
Figura 7.	Tamizado de agregados	43
Figura 8.	Muestra de material a temperatura ambiente y desgranado	47
Figura 9.	Agregado de mezcla asfáltica al picnómetro	47
Figura 10.	Llenado del picnómetro a 3/4 del volumen	48
Figura 11.	Armado del picnómetro en conjunto con la bomba de vacíos.....	48
Figura 12.	Periodo de Vibrodesairador	49
Figura 13.	Llenado completamente del picnómetro	49
Figura 14.	Peso del picnómetro junto con la mezcla y el agua.....	50
Figura 15.	Mezcla homogénea según dosificación de briqueta a ensayar....	54
Figura 16.	Engrasado de collarín para colocación de mezcla	55
Figura 17.	Compactación de briquetas con mazo y pistón	55
Figura 18.	Briquetas con diferentes porcentajes de polipropileno.....	56
Figura 19.	Peso de briquetas al aire	56
Figura 20.	Peso de briquetas en agua	57
Figura 21.	Peso de briquetas en estado seco saturado.....	57
Figura 22.	Briquetas en baño de María.....	64
Figura 23.	Colocación de briquetas y lectura del dial de carga y de flujo.....	64

Figura 24.	Lectura del dial de carga y fluencia	65
Figura 25.	Muestra del agregado	73
Figura 26.	Gráfica de límites de graduación para una granulometría “E”	79
Figura 27.	Curva de granulométrica 1/4" a 0	80
Figura 28.	Curva de granulométrica 3/8" a No. 8.....	81
Figura 29.	Curva de granulométrica 1/2" A 7	82
Figura 30.	Gráfico de combinación granulométrica de los agregados	84
Figura 31.	Horno graduado usado para calentar los materiales y equipo	89
Figura 32.	Equipo utilizado para calentar la mezcla asfáltica	89
Figura 33.	Guantes, recipiente y espátula para mezclar	90
Figura 34.	Termómetros adecuados para medir temperatura	90
Figura 35.	Balanza para pesar los materiales.....	91
Figura 36.	Batería de tamices y tamizadora	91
Figura 37.	Molde con collar de extensión y placa para formar las probeta ...	92
Figura 38.	Martillo de operación manual y pedestal para compactación.....	92
Figura 39.	Longitud nominal de las fibras de polipropileno.....	93
Figura 40.	0.5 % de fibras de polipropileno.....	94
Figura 41.	1.0 % de fibras de polipropileno.....	95
Figura 42.	1.5 % de fibras de polipropileno.....	95
Figura 43.	Peso de combinación de los agregados según su punto	97
Figura 44.	Mezclado de cemento asfáltico con los agregados	97
Figura 45.	Mezcla asfáltica en caliente con fibras de polipropileno.....	98
Figura 46.	Temperatura de mezclado	98
Figura 47.	Briquetas Marshall	99
Figura 48.	Vacíos de aire versus porcentaje de polipropileno	120
Figura 49.	Vacíos en agregado mineral versus porcentaje de polipropileno	120
Figura 50.	Vacíos de relleno asfáltico versus porcentaje de PP	121
Figura 51.	Gravedad específica de la mezcla versus porcentaje de PP	121
Figura 52.	Estabilidad versus porcentaje de polipropileno	122

Figura 53.	Fluencia versus porcentaje de polipropileno.....	122
Figura 54.	Relación: estabilidad/fluencia versus porcentaje de PP	123

TABLAS

Tabla 1.	Especificaciones de asfaltos modificados tipo I.....	10
Tabla 2.	Especificaciones de asfaltos modificados tipo II.....	11
Tabla 3.	Especificaciones de asfaltos modificados tipo III.....	12
Tabla 4.	Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos	15
Tabla 5.	Especificaciones de bitumen (cemento asfáltico)	20
Tabla 6.	Tamaño máximo nominal de agregado (ASTM D 3515)	21
Tabla 7.	Causas y efectos de la poca durabilidad	24
Tabla 8.	Causas y efectos en la mala trabajabilidad	26
Tabla 9.	Causas y efectos de una mezcla demasiado permeable	27
Tabla 10.	Equivalencias grado de penetración y grado de viscosidad.....	35
Tabla 11.	Resultado a prueba de penetración.....	36
Tabla 12.	Resultado a prueba de punto de ablandamiento.....	39
Tabla 13.	Factores de corrección por temperatura del agua.....	59
Tabla 14.	Datos de pesos y volumen de briquetas Marshall	60
Tabla 15.	Resultado de gravedad específica de mezclas compactadas.....	61
Tabla 16.	Factores de corrección de estabilidad	67
Tabla 17.	Datos de estabilidad y fluencia Marshall.....	68
Tabla 18.	Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico.....	69
Tabla 19.	Tipos de mezclas asfálticas	74
Tabla 20.	Agregados para el diseño de la mezcla.....	75
Tabla 21.	Tipo de mezcla según la graduación granulométrica	76
Tabla 22.	Granulometría de agregado 1/4" a 0.....	77
Tabla 23.	Granulometría de agregado 3/8" a No. 8.....	78
Tabla 24.	Granulometría de agregado 1/2" A 7	78

Tabla 25.	Combinación granulométrica del diseño propuesto	83
Tabla 26.	Porcentaje óptimo de asfalto a utilizar	85
Tabla 27.	Porcentajes teóricos de contenido de polipropileno	86
Tabla 28.	Dosificación de materiales	87
Tabla 29.	Parámetros de diseño Marshall	100
Tabla 30.	Parámetros de vacíos en el agregado mineral (VAM).....	101
Tabla 31.	Gravedad específica de la mezcla con 0.00 % de fibras de PP .	104
Tabla 32.	Gravedad específica de la mezcla con 0.50 % de fibras de PP .	105
Tabla 33.	Gravedad específica de la mezcla con 1.00 % de fibras de PP .	105
Tabla 34.	Gravedad específica de la mezcla con 1.50 % de fibras de PP .	106
Tabla 35.	Gravedad específica teórica máxima a 0.00 % de fibras de PP	107
Tabla 36.	Gravedad específica teórica máxima a 0.50 % de fibras de PP	107
Tabla 37.	Gravedad específica teórica máxima a 1.00 % de fibras de PP	108
Tabla 38.	Gravedad específica teórica máxima a 1.50 % de fibras de PP	108
Tabla 39.	Porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.00 % de fibras de PP	110
Tabla 40.	Porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.50 % de fibras de PP	111
Tabla 41.	Porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.00 % de fibras de PP	111
Tabla 42.	Porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.50 % de fibras de PP	111
Tabla 43.	Porcentaje de agregados gruesos y finos según dosificación....	113
Tabla 44.	Porcentaje de vacíos en la mezcla 0.0 % de PP	115
Tabla 45.	Porcentaje de vacíos en la mezcla 0.5 % de PP	115
Tabla 46.	Porcentaje de vacíos en la mezcla 1.0 % de PP	116
Tabla 47.	Porcentaje de vacíos en la mezcla 1.5 % de PP	116
Tabla 48.	Estabilidad y fluencia de la mezcla con 0.00 % de PP	117
Tabla 49.	Estabilidad y fluencia de la mezcla con 0.50 % de PP	117
Tabla 50.	Estabilidad y fluencia de la mezcla con 1.00 % de PP	118
Tabla 51.	Estabilidad y fluencia de la mezcla con 1.50 % de PP	118
Tabla 52.	Resumen de resultados	119

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Asfalto convencional
AC-20	Cemento asfáltico
cm	Centímetros
cm²	Centímetros cuadrados
cm³	Centímetros cúbicos
DTM	Densidad teórica máxima
Ftemp k	Factor de corrección por temperatura de agua
Fvol	Factor de corrección por volumen
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
g	Gramos
Gmbb	Gravedad específica de la mezcla (Bulk)
Gmb	Gravedad específica de la mezcla compactada en (g/cm ³).
Gb	Gravedad específica del asfalto
Gbpp	Gravedad específica del polipropileno
GSB	Gravedad específica efectiva del agregado mineral
Gmm	Gravedad específica máxima de la mezcla
GSE	Gravedad específica neta total del agregado integrado.
Gmmr	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Rice).
Kg	Kilogramos

Ldf	Lectura de dial de carga
Ldc	Lectura del dial de flujo
Lbs	Libras
m	Metro
mm	Milímetro
ppma	Peso del picnómetro agua y muestra
ppa	Peso del picnómetro más agua
Wagua sss	Peso en agua de la muestra en estado sss en gramos
Waire sss	Peso en aire de la muestra en estado sss en gramos
Ws	Peso en el aire de la muestra en estado seco en gramos.
PN	Peso neto
PP	Polipropileno
%AC	Porcentaje de cemento asfáltico
%PP	Porcentaje de polipropileno
%VA	Porcentaje de vacíos
REF	Relación estabilidad / flujo
Sss	Saturado superficialmente seco
VA	Vacíos
VAM	Vacíos de agregado mineral
VRA	Vacíos de relleno asfáltico
Vol.	Volumen
Vcorr.	Volumen corregido
Vsc	Volumen sin corregir

GLOSARIO

AASHTO	Siglas que corresponden a la entidad, American Association of State Highway and Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transportes).
Aglomerante	Material que en estado pastoso y con consistencia variable, es capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto.
Agregado	Material que conforma el esqueleto granular de la mezcla.
Asfalto	También denominado betún, es un material viscoso, pegajoso y de color negro, usado como aglomerante para la construcción de carreteras.
ASTM	Siglas que corresponden a la entidad, American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
Bitumen	Sustancia cementante visco elástica proveniente de la refinación del petróleo.
Briqueta	Mezcla asfáltica compactada en moldes cilíndricos.

Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
Estabilidad	Capacidad de una mezcla asfáltica de resistir deformación bajo cargas aplicadas.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la probeta, bajo la carga de estabilidad Marshall.
Granulometría	Distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un agregado.
Gravedad específica	Propiedad obtenida de la comparación de la densidad de una sustancia con la densidad de una sustancia patrón.
Libro Azul	Documento para la realización de diseño de mezcla asfáltica según requerimientos de la Especificación General para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.
Padegua	Pavimentos de Guatemala S. A.
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Parámetro usado para medir la consistencia del asfalto.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación, se realizó como un estudio teórico práctico para la evaluación de las características físicas y propiedades mecánicas de un diseño de mezcla asfáltica con el método de Marshall, con granulometría tipo “E”, tomando como base la sección 401 de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala (Libro Azul).

La metodología fue comparar un punto de mezcla asfáltica convencional con asfalto AC-20 y otros 3 puntos adicionando un porcentaje de polipropileno (PP) en formato de fibras provenientes de sacos industriales, se evaluó la proporción que se utilizó y la representación que este ocupó en el diseño de mezcla asfáltica. Se llevó a cabo un diseño de mezcla asfáltica convencional y se comparó con el diseño de mezcla asfáltica, adicionando polipropileno (PP), como agregado. Esto con el fin de poder determinar la mejora de las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica a razón del porcentaje de polipropileno en la mezcla asfáltica.

Con el desarrollo de este trabajo se pretendió dar un mejor uso a este material debido a que hay demasiada contaminación ambiental, siendo este el problema fundamental en el deshecho de sacos industriales no tratados. Es por ello que se trató de aplicar a un tratamiento productivo de uso con la interacción a las mezclas asfálticas, por medio del método de Marshall, el cual es muy utilizado actualmente en Guatemala para la producción de mezclas asfálticas.

OBJETIVOS

General

Establecer la modificación de mezclas asfálticas en caliente con la reutilización de fibras de polipropileno proveniente de sacos industriales mediante método de Marshall.

Específicos

1. Obtener la cantidad optima de ligante y porcentaje óptimo de fibras de polipropileno en una mezcla asfáltica modificada.
2. Determinar cuáles propiedades mecánicas mejoran con la implementación de las fibras de polipropileno en una mezcla asfáltica modificada.
3. Verificar si las fibras de desechos industriales pueden funcionar como aditivo estabilizador de la mezcla.

INTRODUCCIÓN

Durante años en todo el mundo la construcción de capas de rodadura en los pavimentos asfálticos se ha realizado mediante mezclas asfálticas usuales que sometidas a la creciente demanda de tránsito, a la acción de los agentes atmosféricos, a la variación de temperatura y el empleo de materiales de baja calidad, presentan fallas estructurales que inciden el comportamiento eficaz del pavimento. Debido a esto se deben buscar alternativas que proporcionen estructuras de pavimento adecuadas al crecimiento de los factores impuestos sobre el mismo, con presupuestos cada vez más restringidos.

Las propiedades de las mezclas asfálticas pueden ser modificadas para mejorar las características de los pavimentos convencionales, dando como resultado una mezcla asfáltica modificada. Las mezclas asfálticas modificadas han demostrado mejores resultados en cuanto a durabilidad en comparación con las mezclas asfálticas convencionales, dando la oportunidad de adecuarlas a unas condiciones específicas de respuesta según las necesidades del proyecto.

Para tratar de solucionar los problemas mencionados anteriormente, se ha optado por modificar las propiedades de los asfaltos, mediante la investigación e implementación de materiales que colaboren con los problemas estructurales y que sean amigables con el medio ambiente. El uso de fibras de polipropileno como adición de mezclas asfálticas es una alternativa que promueve un progreso tecnológico, planteando otro uso con un comportamiento positivo para disminuir las deformaciones y daños de los pavimentos con el consecuente beneficio al obtener periodos de diseño muchos mayores de los pavimentos convencionales. Con este proyecto se busca diseñar una mezcla asfáltica

modificada implementando fibras de polipropileno provenientes de desechos industriales, utilizando ensayos de laboratorio, para constituirlos en aplicaciones para pavimentos, que dé respuesta a la problemática de la red vial en la ciudad de Guatemala, y al mismo tiempo ofrezca una solución ambiental al manejo de los desperdicios (residuos), plásticos.

1. GENERALIDADES

1.1. Pavimento de carreteras

Los pavimentos son un conjunto de capas superpuestas, de una gran diversidad de materiales las cuales son compactadas de una forma adecuada.

1.1.1. Tipos de pavimentos

- Pavimentos rígidos (concreto u hormigón)

Dichos pavimentos están constituidos por una losa de hormigón las cuales pueden estar con armadura o sin armadura apoyado sobre una capa subbase granular, en el que es colocada directamente sobre la Subrasante.

- Pavimentos flexibles (mezcla asfáltica)

El pavimento flexible está constituido por una gama de capas que permite transmitir la carga de tránsito efectuada hasta el terreno natural sin que éste se deforme. La calidad estructural de las capas del pavimento varía con la profundidad, estas capas pueden ser granulares y asfálticas. Dado que la implementación de estas es directamente proporcional al uso que se le desea emplear, ya que difiere según la cantidad de tránsito, tipo de suelo, entre otros.

- Pavimentos semiflexibles

Este tipo de pavimento es caracterizado por utilizar una carpeta de rodadura asfáltica y usa una base grava de cemento en otras palabras, la base está estabilizada con cemento. Posterior a ello utiliza una base granular y una subbase granular hasta llegar al terreno natural.

1.2. Mezclas asfálticas en caliente

Una mezcla asfáltica o bituminosa está constituida por una mezcla de agregados gruesos, finos, polvo mineral y bitumen los cuales deben apegarse a una serie de requerimientos dependiendo de la aplicación o el uso para el cual están siendo diseñados.

Por lo general una mezcla asfáltica en caliente son aquellas que son producidas por el calentamiento de aglutinantes asfálticos los cuales disminuyen su viscosidad y permiten una mezcla homogénea del material con los agregados áridos. La mezcla se realiza a 150 °C en el caso de que el asfalto sea puro, y 160 °C si el asfalto es modificado con algún polímero.

Para la correcta mezcla de estos materiales tanto los agregados pétreos como el cemento asfáltico deben ser secados previamente al mezclado, esto con el fin De poder utilizar agregados secos los cuales favorecerán en la adherencia entre el asfalto y los agregados los cuales brindarán una fluidez y trabajabilidad deseada de la mezcla asfáltica.

En forma general, la mezcla asfáltica en caliente está formado por un rango que oscila entre el (93-97) % de agregados pétreos y un (3-7) % de cemento asfáltico con respecto al total de la masa de la mezcla.

Las propiedades de cada material incluyen directamente proporcional en las propiedades físicas las cuales determinan el comportamiento y el desempeño funcional de la mezcla, ya que al diseñar una mezcla asfáltica en caliente se espera conservar durante su vida útil la Durabilidad, flexibilidad, trabajabilidad, así como resistencia a la deformación, agrietamiento por temperatura, a la fatiga y al daño por la humedad.

1.3. Agregados pétreos

Los agregados pétreos que comúnmente se utilizan en las mezclas asfálticas en caliente pueden ser naturales o procesados. Los agregados tienen formas granulares para una mejor adherencia en la mezcla, el material granular debe cumplir con las granulometrías óptima para la fabricación de mezclas asfálticas.

Los agregados naturales son los que se extraen de depósitos formados por procesos naturales debido a la erosión y degradación por la acción del viento o el agua. Por otra parte, los agregados procesados también son agregados naturales que han sido lavados, tratados o triturados para mejorar sus características físicas haciéndolo adecuado para las mezclas. El material granular procesado es sometido a trituradoras las cuales modifican sus características con la finalidad de cambiar la textura superficial de la partícula de lisa a rugosa o cambiar la forma particular esférica a angular mejorando la distribución de tamaños en las partículas.

Existen dos tipos de agregados los cuales se diferencian según su tamaño nominal siendo estas:

- Agregados gruesos

Los agregados gruesos consisten en grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

- Agregados finos

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o material triturado siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm.

1.4. Ligantes asfálticos

Los ligantes asfálticos son elaborados a partir de residuos provenientes de la destilación del crudo petróleo de origen importado. Estos materiales tienen una función principal la cuál es la de pegar o unir, reciben este nombre porque experimentan una transformación química que dan una cohesión entre dos o más elementos.

Existen dos grandes grupos:

- Aglomerantes

Son aquellos que para unir un material pasa por una reacción física (secado - endurecimiento). Entre ellos se pueden encontrar el asfalto, barro, betún, brea, pegamento, pintura, plástico, resina y silicona.

- Conglomerantes

Son aquellos que para unir un material pasa por una reacción química (fraguado - formación de un nuevo material). este grupo se subdivide en:

- Aéreos

Estos fraguan en presencia del aire entre ellos se encuentran la cal aérea y el yeso.

- Hidráulicos

Estos fraguan en presencia del aire y bajo el agua entre ellos se pueden mencionar la cal hidratada y el cemento.

1.4.1. Tipos de ligante asfáltico

- Cemento asfáltico

Se usa en una mezcla asfáltica en caliente entre los 135 °C a 160 °C.

- Emulsión asfáltica

Hace uso del cemento asfáltico con un 55 % a 70 % más agua. Este se emplea para mezclas asfálticas en frío hasta 60 °C, así como para riego de liga e imprimación.

- Asfaltos espumados

Hace uso del cemento asfáltico más agua fría entre 1 % a 2 % y aire. Éste incrementa el volumen, reduciendo la viscosidad del ligante e incrementando la adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo. Su fabricación es de mezclas en frío y recicladas.

- **Asfaltos modificados**

Este requiere la adición de polímeros para mejorar la rigidez, la resistencia, la susceptibilidad térmica y el daño por humedad.

- **Asfaltos rebajados**

Hace uso del cemento asfáltico y gasolina o bencina. Tiene un alto costo, así como un alto grado de contaminación ambiental y se usa para la imprimación.

1.5. Revestimientos asfálticos

Los revestimientos corresponden a toda aquella capa que no aporta estructuralmente al pavimento y en general la aplicación final de éste, en términos del espesor no sobrepasarán los 3 cm.

Dentro de esta clasificación se encuentran:

- **Riegos asfálticos**

El riego asfáltico básicamente es la aplicación de un asfalto en estado líquido, ya sea que este se encuentre sobre la capa granular o sobre una capa asfáltica, el cual cumple un objetivo específico.

- Riegos asfalto - agregado

Este tipo de riego asfáltico cubre una o más capas de agregados ya sea arena fina para preservar por corto tiempo bases estabilizadas o grava y para tratamiento superficial simple o doble. El espesor del revestimiento se determina según el tamaño nominal del agregado pétreo de la primera capa, Por otro lado, las capas sucesivas de agregados pétreos, únicamente se llenan los huecos de la capa anterior.

- Sellos de mezcla

Es una mezcla del gigante asfáltico cubierto con uno o varias capas de agregado colocado sobre un pavimento existente. dependiendo del tamaño del agregado será la función u objetivo de cada sello. Este se aplica en cualquier tipo de mezcla colocada en espesores delgados para corregir fallas funcionales.

- Sellos de ficción

Este sello se aplica únicamente en mezclas abiertas colocándolas en espesores delgados para mejorar el drenaje superficial.

- Lechadas

Es una mezcla de agregados finos más *filler* en conjunto con el agua y una emulsión.

1.6. Agrietamiento por fatiga

Este tipo de agrietamiento es causado comúnmente por repeticiones de cargas por acción del tránsito, estas sufren un agrietamiento estructural relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa superando lo admisible. A esto se le denomina falla por fatiga o sea por repeticiones de carga.

El agrietamiento por fatiga más común en los pavimentos es la fisura de piel de cocodrilo (FPC). Esta corresponde a una serie de fisuras interconectadas que forman polígonos irregulares generalmente localizadas en los puntos donde existe un flujo vehicular prolongado. Las causas principales de este tipo de fisura es cuando la capa superficial es sometida a repetidas cargas en un mismo sitio superiores a las permisibles, así como la insuficiencia estructural del pavimento.

1.7. Agrietamiento por temperatura

Son fisuras causadas principalmente por las contracciones del pavimento asfáltico las cuales reducen sus propiedades mecánicas y afectan la calidad y eficiencia de la mezcla asfáltica. Debido a las variaciones de la temperatura o gradientes térmicos durante el día, producen un ciclo de esfuerzo-deformación sobre la mezcla, estas generan fisuras indicando que el asfalto se ha endurecido lo cual sucede debido al envejecimiento de la mezcla o al uso inapropiado de asfaltos para el clima del lugar.

1.8. Mezclas asfálticas modificadas

Existen ocasiones en que los asfaltos convencionales no son capaces de resistir a la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta de suma

necesidad la utilización de ligantes modificados que mejoren las propiedades físicas y mecánicas del asfalto. De dicho problema surge la necesidad de crear mezclas asfálticas modificadas.

Los modificadores aumentan la resistencia de las Mezclas asfálticas a la deformación y a esfuerzos de tensión repetidas como la fatiga. Los modificadores reducen el agrietamiento, La susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de la temperatura. Estos modificadores son adicionados previamente al mezclado del material pétreo.

Las mezclas asfálticas modificadas presentan altos valores de rigidez a temperaturas altas de servicio, lo que disminuye el ahuellamiento, y baja rigidez a temperaturas bajas, reduciendo el riesgo de aparición de fisuras prematuras.

Existen varios tipos de Cementos asfálticos modificados con el cual el grupo de trabajo No. 31 de la AASHTO-AGC (American General Contractor)-ARTBA (American Road and Transportation Builders Association) han podido agrupar las múltiples variedades de asfaltos modificados con polímeros en los siguientes grupos:

- Tipo I

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas tanto altas como bajas temperaturas. La mayoría de estos cementos asfálticos modificados que cumplen con esta especificación tienen semibloques de Butadieno y pueden ser configuraciones de bibloques del tipo SB o tribloques del tipo SBS.

Tabla 1.*Especificaciones de asfaltos modificados tipo I*

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo I			
			I-A	I-B	I-C	I-D
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min.	100	75	50	40
		Máx.	150	100	75	75
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	AASHTO T 49	Min.	40	30	25	25
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Min.	1000	2500	5000	5000
Viscosidad, 135° C, centí Stokes	AASHTO T 201	Máx.	2000	2000	2000	2000
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	AASHTO T 53	Min.	43.3	48.9	54.4	60
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	218.3	218.3	232.2	232.2
Solubilidad en Tricloro etileno (TCE), % ⁽¹⁾	ASTM D 2042	Min.	99	99	99	99
Separación ⁽²⁾ , diferencia R & B, ° C	AASHTO T 44	Máx.	2.2	2.2	2.2	2.2
Ensayo del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT)						
Recuperación elástica ⁽³⁾ , a 25° C, %	AASHTOT179	Min.	45	45	45	50
Penetración a 4° C, 200g y 60s	AASHTO T 49	Min.	20	15	13	13

Nota. La tabla muestra las propiedades para los distintos tipos de asfaltos modificados. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 19 de octubre del 2019. De dominio público.

- Tipo II

Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Corresponden a las propiedades del cemento asfáltico convencional después de modificarlo con látex de hule de Estireno Butadieno (SBR) o Neopreno. Este tipo se subdivide en las clases II-A, II-B y II-C, los cuales tienen las especificaciones de la siguiente tabla.

Tabla 2.*Especificaciones de asfaltos modificados tipo II*

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo II		
			II-A	II-B	II-C
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min.	100	70	80
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Min.	800	1600	1600
Viscosidad, 135° C, centi Stokes	AASHTO T 201	Máx.	2000	2000	2000
Ductilidad, 4° C, 5 cpm, mm	AASHTO T 51	Min.	500	500	250
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	232.2	232.2	232.2
Solubilidad, %	AASHTO T 44	Min.	99	99	99
Endurecimiento, 25° C, 20 ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	0.429	0.629	0.629
Tenacidad, 25° C, 20ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	0.286	0.429	0.429
Ensayo del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT) AASHTO T 179					
Viscosidad, 60° C, Poises	AASHTO T 202	Máx.	4000	8000	8000
Ductilidad, 39.2, 5 cpm, mm	AASHTO T 51	Min.	250	250	80
Endurecimiento, 25° C, 20ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	-	-	0.629
Tenacidad, 25° C, 20 ipm, N-m	ASTM D 5801	Min.	-	-	0.429

Nota. La tabla muestra las propiedades según para los distintos tipos de asfaltos modificados. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 19 de octubre del 2019. De dominio público.

- Tipo III

Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de mezclas asfálticas disminuyendo la susceptibilidad del cemento asfáltico a las temperaturas, mejorando su comportamiento a altas temperaturas. Estas corresponden a las propiedades del cemento asfáltico convencional después de modificarlo con acetato vinilo etileno o con polietileno. De este tipo se distinguen las clases III-A, III-B, III-C, III-D y III-E, con las especificaciones de la siguiente tabla.

Tabla 3.*Especificaciones de asfaltos modificados tipo III*

Propiedades	Norma		Clases de Asfalto Modificado Tipo II				
			III-A	III-B	III-C	III-D	III-E
Penetración, a 25° C, 100g y 5 s	AASHTO T 49	Min.	30	30	30	30	30
		Máx.	130	130	130	130	130
Penetración, a 4° C, 200g y 60 s	AASHTO T 49	Min.	48	35	26	18	12
Viscosidad, 135° C, centi Stokes	AASHTO T 201	Min.	150	150	150	150	150
		Máx.	1500	1500	1500	1500	1500
Punto de ablandamiento, R & B, ° C	AASHTO T 53	Min.	125	130	135	140	145
Punto de Flama, ° C	AASHTO T 48	Min.	218.3	218.3	218.3	218.3	218.3
Separación		Min.	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Ensayos del Residuo del Horno de Película Delgada (RTFOT)	AASHTO T 179						
Perdida por calentamiento, %	AASHTO T 179	Máx.	1	1	1	1	1
Penetración a 4° C, 200g y 60s	AASHTO T 49	Min.	24	18	13	9	6

Nota. La tabla muestra las propiedades según para los distintos tipos de asfaltos modificados. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 19 de octubre del 2019. De dominio público.

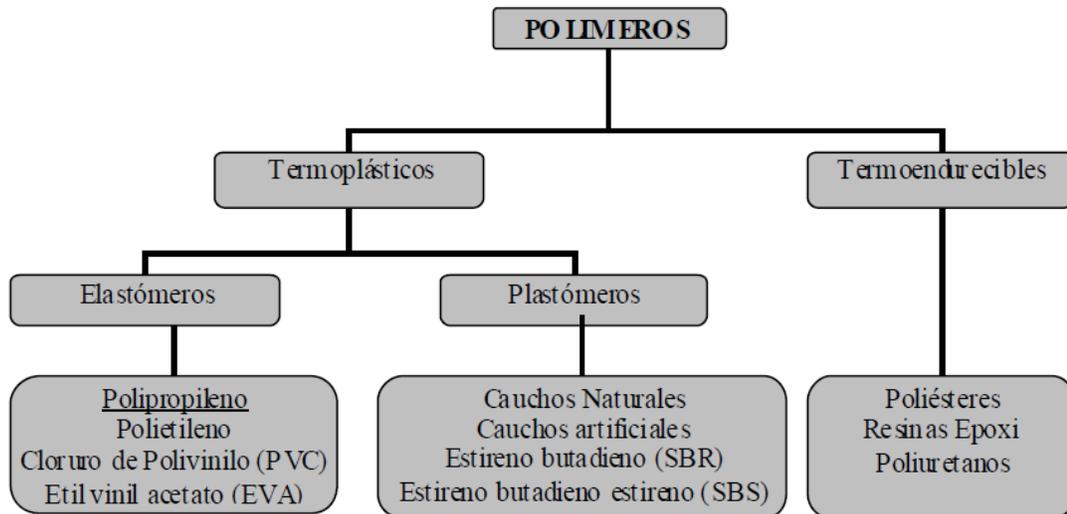
1.9. Mezclas asfálticas con adiciones de polímeros

Los materiales asfálticos modificados son el producto de la disolución o incorporación del asfalto con un polímero, que son sustancias resistentes al tiempo y a cambios de temperatura, que se le añaden al material asfáltico para modificar y mejorar sus propiedades físicas.

Los polímeros son sustancias macromoleculares naturales o sintéticas, que son obtenidas por reacciones poliméricas a partir de moléculas más sencillas. Según su estructura y características los polímeros se pueden clasificar de la siguiente manera:

Figura 1.

Clasificación de los polímeros



Nota. Esquema que muestra los tipos de polímeros. Obtenido de T. Velásquez (2007). *Modificación de mezclas asfálticas con fibras de polipropileno.* (<https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/52b63122c83c44fb9763cddc967a6a66/content>), Consultado el 15 de noviembre de 2020. De dominio público.

La implementación de polímeros en las mezclas asfálticas hace que éstas sean idóneas e incrementen la adherencia en la interface entre el material pétreo y el material asfáltico, conservándolo aún en presencia del agua. Los polímeros también aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos o sea a la fatiga, reduciendo el agrietamiento, así como la susceptibilidad a las variaciones de temperatura en las capas asfálticas.

Para que una mezcla asfáltica con polímero sea óptima, hay que seleccionar cuidadosamente el asfalto base, es de suma importancia que los polímeros sean compatibles con el material asfáltico. Cada polímero tiene un

tamaño de partícula de dispersión óptima para mejorar las propiedades reológicas, si éste se encuentra por encima, el polímero actuará únicamente como un filler y si se encuentran por debajo de ésta, pasan a estar muy solubilizados aumentando la viscosidad, sin mejorar la elasticidad y la resistencia.

El polímero puede presentarse en forma de polvo, pequeñas bolitas, grandes paneles o en forma fibrosa, la temperatura del mezclado dependerá del tipo de polímero a utilizar.

Al momento de añadir polímeros al asfalto, las propiedades Mejoran principalmente a altas temperaturas y únicamente tiene un efecto limitado sobre las propiedades a bajas temperaturas. estas propiedades a bajas temperaturas del asfalto modificado son determinadas principalmente por el grado de asfalto base. Las características mecánicas pueden ser mejorados a lo largo de todo el rango de temperaturas de operación por medio de mezclas poliméricas adecuadas usando un grado y tipo adecuado de asfalto.

Tabla 4.*Polímeros típicos utilizados para modificar asfaltos*

Tipo	Presentación	Composición Química
1. Elastómeros:		
• Copolímero de Bloque	Látex	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Copolímero de Bloque	Grumos	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
• Homopolímero	Látex	Policloropreno
• Copolímeros aleatorios	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Pre-mezclado	Estireno-Butadieno (SB)
• Copolímero aleatorio	Látex	Estireno-Butadieno-Hule (SBR)
• Copolímero de Bloque	Granulado o en polvo	Estireno-Butadieno-Estireno (SBS)
2. Plastómeros:		
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Homopolímero	Premezclado con el CA	Polietileno de Baja Densidad (LDPE)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Vinilo Acetato (EVA)
• Copolímero	Granulado o en polvo	Etileno Metilacrilato (EMA)
• Copolímero	Pelotitas (Pellets)	Etileno Vinilo Acetato (EVA)

Nota. La tabla muestra los tipos de polímeros usados con mayor frecuencia con base a sus composiciones químicas. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 411.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), Consultado el 17 de noviembre de 2020. De dominio público.

1.10. Polipropileno

Éste un termoplástico muy versátil ya que tiene un buen equilibrio de resistencia térmica y química, con excelentes propiedades mecánicas y elásticas.

El polipropileno tiene muchas ventajas con respecto a los demás polímeros ya que tiene un bajo peso específico o sea densidad, excelente resistencia química, buen balance rigidez/tenacidad, éste también es adaptable a muchos métodos de transformación, así como tiene una alta temperatura de

fusión comparado con otros plásticos y a todo esto los favorecen su bajo costo. Cabe mencionar que entre sus desventajas se encuentran la inflamabilidad, fragilidad a bajas temperaturas, baja adhesividad y baja resistencia UV.

1.10.1. Definición

El polipropileno (PP) es un polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Este pertenece al grupo de las poliolefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones.

1.10.2. Degradación y reciclaje del polipropileno PP

El polipropileno es susceptible de degradación debido a la exposición al calor y la radiación UV, como la presencia en la luz del sol. Este material por ser una forma muy refinada del petróleo tiene un poder calorífico muy alto el cual se degrada a los 285 °C. En cuestión de años se podría decir que la duración del polipropileno a desintegrarse es de 500 años. Es por ello que la vía más óptima para la reutilización de dicho Molinero es el reciclaje.

El polipropileno es un plástico reciclable y se puede identificar con su numeración 5 como código de identificación de resinas junto a las siglas PP.

1.10.3. Propiedades del polipropileno PP

El propileno tiene un grupo metilo más que el etileno, este carbono extra mejora en general las propiedades mecánicas y térmicas del polipropileno en comparación con otro polímero. Cabe resaltar que existen diferentes tipos de polipropileno, cada uno con un peso molecular, cristalinidad e isotacticidad

diferente que influye en las características finales del polímero. los tipos más importantes de polipropileno son:

- polipropileno Homopolímero
- polipropileno Copolímero

Entre las propiedades más útiles del polipropileno se encuentran:

- Material ligero: es uno los plásticos con menos densidad, entre 0.895 y 0.92 g/cm³.
- Estructura cristalina: las formas isotácticas tiene mayor grado de cristalinidad y mayor resistencia mecánica.
- Alta resistencia mecánica.
- Excelente aislante eléctrico.
- Baja absorción de humedad: el polipropileno no se daña con el agua por la bajísima absorción de humedad.
- Alto punto de fusión: el punto de fusión del polipropileno está en torno a los 160 °C, lo que hace que se pueda utilizar en aplicaciones de alta temperatura a las que no se pueden utilizar otros polímeros. Para el uso continuo se recomienda una temperatura máxima de 100 °C.
- Resistencia química: el polipropileno es altamente resistente a la corrosión tanto por agentes ácidos como por agentes alcalinos.

También es muy resistente a la acción de detergentes y sustancias electrolíticas.

1.10.4. Preparación de polipropileno para mezclas asfálticas

Al polipropileno se le da la forma de fibra mediante la técnica de extrusión y estirado para la óptima adhesión en la mezcla asfáltica. La extrusión en plano general varía entre los 230 °C. a 300 °C, luego es enfriado rápidamente con agua, luego es orientado con rodillos jaladores de velocidad diferencial. posteriormente se sigue con el proceso de corte con el grosor deseado, en este caso las fibras tienen un promedio de longitud de entre 3 a 4 mm.

El polipropileno es ideal de entre todos los polímeros para su implementación en una mezcla asfáltica en caliente, ya que dicho polímero soporta altas temperaturas, de esta manera el polipropileno garantiza el máximo desempeño de las fibras en la mezcla asfáltica. Por otro lado, las fibras de polipropileno tienen propiedades adecuadas para tener una buena reacción con el asfalto y desempeñar un buen papel en la mezcla con los agregados y el asfalto.

2. CARACTERÍSTICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

2.1. Contenido de bitumen (cemento asfáltico)

El bitumen es un conjunto de sustancias orgánicas viscosas, con un color negro, de alta densidad que es completamente soluble principalmente por hidrocarburos. El bitumen tiene una amplia gama de consistencias, esta variación de sólido y semisólido se clasifica detalladamente según el tipo y grado de bitumen que existe tabla 5. Estas son usadas según las características ambientales de la ubicación para la construcción del pavimento flexible. Para que el bitumen pueda cubrir por completo las partículas de agregado granular durante la producción de mezcla asfáltica en caliente es de suma importancia calentar el bitumen a altas temperaturas para poder ablandarlo y que este se transforme a un estado líquido para su óptima aplicación.

Tabla 5.*Especificaciones de bitumen (cemento asfáltico)*

Tipo y grado del cemento asfáltico	Especificación
Graduación por viscosidad:	AASHTO M 226
• AC-10	
• AC-20	
• AC-40	
Graduación por penetración:	AASHTO M 20
• 40-50	
• 60-70	
• 85-100	
• 120-150	AASHTO MP 1
Graduación PG (<i>Performance Grade</i>):	
• 64-22	
• 70-22	
• 76-22	AASHTO MP 1
• 82-22	

Nota. La tabla muestra los tipos y grados del cemento asfáltico según normas AASHTO. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 411.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), Consultado el 17 de noviembre de 2020. De dominio público.

La cantidad específica proporcional de bitumen debe ser calculada previamente en el laboratorio, para posteriormente ser supervisada cuidadosamente en la ejecución de la obra. Ésta depende de la granulometría a utilizar para el diseño de la mezcla asfáltica, la cuál debe ser aplicada cuidadosamente según las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, esto conlleva a seleccionar un rango específico del tamaño nominal del agregado, qué será

utilizado para el diseño de mezcla asfáltica, así como el rango a utilizar de bitumen en relación con el peso de los agregados pétreos. Se establecen ciertos criterios mediante el método de diseño en qué se trabajará el contenido de bitumen, los cuales tienen las especificaciones de la siguiente tabla 6.

Tabla 6.

Tamaño máximo nominal de agregado (ASTM D 3515)

	Graduación designada y tamaño máximo nominal del agregado a utilizar					
Tipo de granulometría	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
Tamaño máximo del agregado	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
Porcentaje de bitumen	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12

Nota. La tabla muestra dosificaciones de agregado grueso según su tipo de granulometría. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 411.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), Consultado el 20 de noviembre de 2020. De dominio público.

Para la implementación de un contenido óptimo de betún para una mezcla se deben verificar las características de los agregados tales como la granulometría y la capacidad de absorción entre otros.

Si la granulometría de los agregados es más fina, el diseño de la mezcla tendrá una mayor área a cubrir en los agregados pétreos. Añadiendo a esto las características de absorción de los agregados, se requerirá una mayor cantidad de bitumen para cubrir por completo las partículas uniformemente.

Por otra parte, una mezcla gruesa exige una menor cantidad de bitumen debido a que tienen una menor área superficial a cubrir.

2.2. Resistencia a la deformación

La deformación se caracteriza principalmente por la acción transversal de la superficie del pavimento, las cuales ya no tienen su posición original, asociado a temperaturas relativamente altas, así como la constante carga sobre su superficie. Para evitar dicho problema, la mezcla está elaborada con un betún de consistencia fuerte. El tipo de betún, la composición granulométrica, la calidad de los agregados pétreos y los aditivos empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica están relacionados en función del comportamiento de la mezcla asfáltica frente a las deformaciones.

Las deformaciones de los pavimentos asfálticos flexibles se pueden visualizar en forma de canales que se forman longitudinalmente en direcciones paralelas al flujo vehicular, para ser más precisos, estos se forman exactamente en las huellas por donde giran los neumáticos sobre el pavimento asfáltico. Esos canales formados representan la acumulación de pequeñas deformaciones generadas por aplicaciones de cargas que provienen del flujo constante de vehículos sobre la superficie del pavimento asfáltico, ocasionando una de las formas de deterioro y desgaste que más comúnmente se encuentran en los pavimentos asfálticos de mala calidad.

2.3. Resistencia a la fatiga

Se define como la capacidad que tiene un pavimento asfáltico para soportar el esfuerzo a flexión continuamente, la cual es causada por las cargas simultáneas de los vehículos. El porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica debe ser la idónea para la realización del mismo, ya que, si el porcentaje de vacíos es muy alto, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por otro lado, si la mezcla asfáltica presenta una granulometría densa, esta tiene una mayor

resistencia a la fatiga que una mezcla asfáltica fina. Otro parámetro que da como resultado una menor resistencia a la fatiga es el tiempo de envejecimiento y endurecimiento del betún en la carpeta de rodadura.

La resistencia y la durabilidad dependen del espesor de un pavimento y la capacidad de soporte de la capa subrasante, la cual influye determinadamente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta una buena resistencia a la fatiga y la subbase está mal compactada, la resistencia a la fatiga disminuirá considerablemente y se podrá hacer visible los asentamientos en la carpeta asfáltica. En el caso contrario, si la capas de subbase está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga, esta perjudicará directamente proporcional a las capas internas, lo cual dañará considerablemente la estructura del pavimento. Es por ello que el pavimento debe trabajar en conjunto para que ambas puedan soportar el esfuerzo a flexión causada por el flujo vehicular.

2.4. Resistencia al agrietamiento por temperatura

Uno de los factores más determinantes que se deben cuidar en una mezcla asfáltica es la temperatura, ya que la variación de la temperatura ocasiona cambios en la estructura del pavimento, debido a la conducción del gradiente de temperatura en la mezcla. Si la conducción de calor es muy alta, la mezcla conducirá uniformemente el calor en la mezcla, así como la reflectividad por medio del agregado seleccionado, lo que afectará ocasionando deformaciones en el pavimento.

Por otra parte, cuando las temperaturas son muy bajas, si la mezcla no contiene la suficiente rigidez para la condición climática, esta será afectada con el agrietamiento el pavimento.

2.5. Durabilidad

La durabilidad es una propiedad muy importante en una mezcla asfáltica ya que dicha propiedad soporta los efectos provocados por factores como el agua, temperatura, aire y cargas las cuales son sometidas por el flujo vehicular. Si esta propiedad se ve afectada, provocaría la desintegración y desprendimiento de los agregados en el pavimento. De la misma manera si existiera algún cambio en las propiedades del bitumen, provocaría la polimerización, oxidación y envejecimiento del pavimento.

En la siguiente tabla se muestran las características que se pueden ver afectadas en la durabilidad de una mezcla asfáltica.

Tabla 7.

Causas y efectos de la poca durabilidad

Causas	Efectos
Bajo contenido de bitumen (cemento asfáltico).	Endurecimiento rápido del asfalto y desintegración por pérdida de agregado.
Alto contenido de vacíos debido al diseño o a la falta de compactación.	Endurecimiento temprano del asfalto seguido por agrietamiento o desintegración.
Agregado susceptibles al agua (hidrofilitos).	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada o desintegrada.

Nota. La tabla muestra una comparación de causas y efectos según la durabilidad del asfalto. Obtenido de Asphalt Institute (1994). *Manual MS-22 Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.* (<https://www.asphaltinstitute.org/>), Consultado el 20 de noviembre de 2020. De dominio público.

2.6. Trabajabilidad

La trabajabilidad es una propiedad que facilita la colocación y compactación de una mezcla asfáltica con un esfuerzo razonable. Es por ello que si la mezcla asfáltica tiene una buena trabajabilidad es sencilla colocarla y compactarla. Por otro lado, si la mezcla presenta una baja trabajabilidad, dificultad y complica la colocación y compactación de la mezcla asfáltica. Cuando la calidad de los agregados o la adherencia por medio del bitumen es muy baja existen problemas de trabajabilidad durante los trabajos de pavimentación.

La granulometría gruesa en mezclas asfálticas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso, tiende a segregarse en el tiempo de su manejo, lo cual dificulta su maniobrabilidad al momento de colocar y compactar la mezcla asfáltica en la superficie. Es por ello que no sólo el bitumen es el principal causante de los problemas de trabajabilidad.

Otro factor que influye circunstancialmente es la viscosidad, ya que, si el bitumen no es calentado lo suficiente, este disminuye su trabajabilidad; de la misma manera, si el bitumen es calentado demasiado, la mezcla se volverá muy floja.

Para que una mezcla asfáltica en caliente tenga una óptima trabajabilidad, se requiere que el pavimento oscile en un rango de temperatura aproximados a 150 °C, esto dependerá según la viscosidad del bitumen. Por otra parte, los agregados pétreos se calientan previamente para que el asfalto no disminuya su temperatura al tener contacto con ellos, es por ello que la colocación en obra se realizará con temperaturas muy elevadas, dado que, si no se realizan con temperaturas altas, los materiales no podrán extenderse y mucho menos compactarse adecuadamente.

Tabla 8.

Causas y efectos en la mala trabajabilidad

Causas	Efectos en la carpeta
Tamaño máximo de partícula: grande.	Superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiado agregado grueso.	Puede ser difícil de compactar
Temperatura muy baja de mezcla.	Agregado sin revestir, mezcla poco durable; superficie áspera, difícil de compactar.
Demasiada arena de tamaño medio.	La mezcla se desplaza bajo la compactadora y permanece tierna o blanda.
Bajo contenido de relleno mineral.	Mezcla tierna, altamente permeable.
Alto contenido de relleno mineral.	Mezcla muy viscosa, difícil de manejar; poco durable.

Nota. La tabla compara las causas y efectos según la trabajabilidad del asfalto. Obtenido de Asphalt Institute (1994). *Manual MS-22 Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.* (<https://www.asphaltinstitute.org/>), Consultado el 21 de noviembre de 2020. De dominio público.

2.7. Resistencia a la humedad

La resistencia a la humedad es una característica que debe tener la carpeta asfáltica, ya que previene el paso del agua hacia su interior o a través del mismo. Si una mezcla asfáltica está expuesta a la humedad, esta pierde adhesión entre las partículas del agregado y el cemento asfáltico. El porcentaje de vacíos es otro factor que qué hace susceptible al paso de agua a una mezcla asfáltica.

Los revestimientos de los agregados son los principales responsables al paso del agua, es por ello que se deben revestir los agregados con el bitumen o cemento asfáltico, ya que éste lo hará resistente e impermeable al agua. En este caso, el problema es si el agua se llegase a filtra en la carpeta de rodadura debido a la mala implementación del bitumen, dejando al descubierto las partículas del agregado, provocará la separación de los mismos, formando la aparición de los baches y fallas por fatiga, debido a que los agregados se separaran y serán arrastrados por los vehículos.

Tabla 9.

Causas y efectos de una mezcla demasiado permeable

Causas	Efectos en la carpeta
Alto contenido de vacíos en la mezcla de diseño.	El agua y el aire pueden entrar fácilmente en la carpeta asfáltica, causando oxidación y desintegración de la mezcla
Compactación inadecuada.	Resultará en vacíos altos en la carpeta asfáltica, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.

Nota. La tabla compara las causas y efectos según la permeabilidad del asfalto. Obtenido de Asphalt Institute (1994). *Manual MS-22 Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente.* (<https://www.asphaltinstitute.org/>), Consultado el 21 de noviembre de 2020. De dominio público.

3. METODOLOGÍA

Dicho trabajo se basa en la norma ASTM D-1559 equivalente a la norma AASHTTO T-225. Dicha norma detalla el procedimiento en el cual se diseñan las mezclas por el método Marshall, así como la interpretación de los resultados. Para la elaboración de este trabajo de graduación se aplicarán diferentes porcentajes de polipropileno en formato de fibra el cual será adherido a una mezcla tradicional, usando granulometría tipo "E" y una mezcla asfáltica AC-20.

3.1. Fibras de polipropileno

Como es del conocimiento el polipropileno es un termoplástico muy versátil ya que tiene Un buen equilibrio de resistencia química y térmica, con excelentes propiedades eléctricas y mecánicas.

El polipropileno se puede obtener de 3 diferentes formas geométricas de la cadena polimérica.

- Isostática
- Atáctico
- Sindiotáctico

Los propilenos utilizados comercialmente por lo general son Isotácticos en un 94 a un 97 %, Estos son utilizados para inyección o extracción.

Al momento obtener las fibras de polipropileno estas presentan algunas ventajas tales como:

- Excelente resistencia química
- Bajo peso específico (densidad)
- Buen balance rigidez/tenacidad
- Bajo costo
- Adaptable a muchos métodos de transformación
- Alta temperatura de fusión (comparado con otros plásticos)

Entre las propiedades que se consideran como desventajas están:

- Rigidez moderada
- baja adhesividad
- fragilidad a bajas temperaturas
- inflamabilidad
- baja resistencia cuando está fundido

La técnica de producción de las fibras (monofilamentos o multifilamentos), es a base de extrusión y estirado. La temperatura para lograr la extrusión oscila general entre los 230 a 300 °C, posteriormente es enfriado rápidamente con agua y orientado con rodillos jaladores de velocidad diferencial. Luego sigue un proceso de corte con el grosor deseado en este caso las fibras tienen un promedio de 3 a 4 mm.

3.1.1. Selección de tipo de fibra

Para este trabajo se realizó la búsqueda de fibras de polipropileno que soportarán las altas temperaturas de mezcla las cuales se ven sometidas en el asfalto, para garantizar el desempeño de las fibras de mezclas asfálticas. Por otro lado, estas fibras debían tener propiedades adecuadas para obtener una buena reacción con el asfalto para poder desempeñar un buen papel en la mezcla con los agregados y el asfalto.

La fibra seleccionada es procedente de la empresa Sacos Agroindustriales (DISAGRO), ver figura 2. Esta fibra es de polipropileno, se utilizan para el tejido de sacos industriales.

Figura 2.

Sacos provenientes de desechos industriales



Nota. Muestra general de materia prima para la elaboración de las probetas. Elaboración propia.

3.1.2. Proceso de extracción de la fibra

Los sacos fueron limpiados y desinfectados para eliminar cualquier resto de materia orgánica para que el mismo no influyan los valores de los ensayos a realizar. Teniendo ya listos los sacos se procedió a deshilar los sacos para extraer sus fibras de manera homogénea, ver figura 3.

Figura 3.

Extracción de fibras provenientes de sacos industriales



Nota. Muestra general de materia prima en estado de fibra provenientes de sacos industriales.
Elaboración propia.

3.1.3. Tamaño nominal de las fibras

Las fibras son seleccionadas según su ancho nominal el cual tiene un promedio de 3mm. Dichas fibras fueron reunidas para proceder a hacer cortes correspondientes a una longitud nominal de 1/3 de la altura de las probetas, la cual corresponde 1/3 de 63.5 mm aproximadamente ósea 21.17 mm o 2.12 cm.

Figura 4.

Resultado final de las fibras provenientes de sacos industriales



Nota. Muestra general de materia prima recortada a un largo nominal propuesto. Elaboración propia.

3.2. Prueba de penetración del bitumen asfáltico (AASHTO T- 49, ASTM D-5)

Esta prueba permite determinar las consistencias del bitumen asfáltico mediante la penetración vertical de una aguja en una muestra, dicho material de muestra está bajo condiciones establecidas de masa, tiempo y temperatura.

3.2.1. Procedimiento

Se debe tomar en cuenta cada uno de estos pasos para una buena ejecución de este ensayo, así mismo debe ser realizado con la el mayor orden y cuidado posible para obtener el menor grado de error humano.

- Como primer paso se debe de colocar la cápsula de penetración que contiene la muestra de la prueba dentro del recipiente, para luego de introducirlo en el baño de María, cuando éste mantenga una temperatura estable de 25 °C o 77 °F. Se sumerge dicho recipiente completamente y se mantiene así por espacios de 2 horas con objeto de que la muestra es asfáltica adquiera la misma temperatura.
- Como siguiente paso se debe de colocar el penetrómetro sobre una superficie firme y plana, luego se acopla la aguja a manera de que tenga una masa de 100 ± 0.1 gramos o ya sea la especificación que determinen la prueba y finalmente se nivela perfectamente el penetrómetro.
- Teniendo ya calibrada la aguja, se debe de extraer la muestra del baño de María, cuidando de que tenga agua suficiente para cubrir completamente la cápsula. Se coloca en el recipiente y la cápsula sobre la base del penetrómetro de tal manera que la muestra quede bajo la aguja. Se ajusta la altura de la aguja a manera de que el reflejo de la aguja quede en contacto con la superficie del agua.
- Teniendo en cuenta que la aguja está reflejada sobre la película de agua suprime el sujetador para liberar la aguja únicamente durante 5 segundos o durante el tiempo que especifique la prueba, después de lo cual se toma la lectura registrando decimos de milímetros que penetró la aguja.

- La prueba debe de tener por lo menos 3 penetraciones en 3 puntos diferentes, se debe limpiar la aguja cuidadosamente después de cada penetración. Posterior a eso, se debe regresar la muestra al recipiente de baño de maría.
- Como resultado de la prueba, el promedio de las profundidades a las que haya entrado la aguja en 3 ocasiones, están expresadas en décimos de milímetros y con la aproximación a la unidad este valor también es conocido como grado de penetración, a continuación, se muestra el cuadro de especificaciones entre el grado de penetración por el grado de viscosidad ver tabla 10.

Tabla 10.

Equivalencias grado de penetración y grado de viscosidad

Grado de Penetración	Grado de Viscosidad AC (Asphalt Cement)
40-50	AC-40
60-70	AC-20
85-100	AC-10
120-150	AC-5
200-300	AC-2.5

Nota. Tabla de que muestra el grado de penetración según su viscosidad. Obtenido de P. Cox (2015). *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente.* (p. 84). PC.

3.2.2. Análisis de resultados

Las condiciones ambientales son determinantes y fundamentales para el resultado del ensayo tanto en temperatura y el tiempo de penetración, si los

resultados de penetración no cumplen con las especificaciones, el asfalto no se puede utilizar para diseños de mezclas asfálticas en caliente. Con este ensayo se determina la dureza del asfalto a temperatura ambiente controlado.

Tabla 11.

Resultado a prueba de penetración

Análisis	Unidad	Resultado	Rangos	Método
Penetración a 77 °F, 100 g, 5 seg.	0.1 mm	82	≥ 60	ASTM D-5

Nota. Detalle del resultado en la prueba de penetración para la realización del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.3. Conclusiones

Según los resultados obtenidos, el asfalto está por encima de 60 cumpliendo con las especificaciones dentro del rango de un cemento asfáltico tipo AC-20, lo cual indica que es un asfalto muy blando, de lo contrario si fuese el resultado menor a 60, indicaría que el asfalto es muy rígido y que ha perdido su propiedad por oxidación.

3.3. Prueba de ablandamiento del bitumen (AASHTO T-53)

Con la prueba de ablandamiento del bitumen, se puede estimar la consistencia del cemento asfáltico, ya que se basa en la determinación de la temperatura a las cuales una esfera de acero produce una deformación de 25 milímetros, en una muestra de asfalto sostenida por un anillo horizontal, la cual es calentada dentro de un recipiente con agua.

3.3.1. Procedimiento

A continuación, se detalla el procedimiento para la realización de la prueba de ablandamiento del bitumen:

- Se debe tomar en cuenta cada uno de estos pasos para una buena ejecución de este ensayo, así mismo debe ser realizado con la el mayor orden y cuidado posible para obtener el menor grado de error humano.
- Se debe de tomar una muestra de cemento asfáltico la cual deberá estar caliente a una temperatura de 300 °F, la cual se le deberán colocar los anillos sobre una base de vidrio, lubricada previamente para evitar que se adhiera a la muestra.
- Posterior a que la muestra llegue a una temperatura ambiente se procederá a rasar la muestra a nivel de los anillos con una espátula previamente calentada para facilitar el corte.
- Cuando la muestra se encuentre cortada, se deberá ensamblar al sistema de soporte, colocando en su lugar los anillos con la muestra de prueba, las guías y el termómetro de manera que la parte inferior del bulbo quede al mismo nivel que la parte inferior de los anillos, Sin que toque las paredes del orificio central del porta anillos.
- Posterior a ello se deberá llenar el vaso de vidrio hasta una altura de 10 cm, con agua destilada a una temperatura de 5 ± 1 grado Celsius y mantener por 15 min.

- Luego se tiene que colocar las bolas de acero previamente acondicionados a la temperatura establecida anteriormente en las guías que permiten centrarlas. Se debe aplicar calor de manera que la temperatura del agua aumente gradualmente 5 grados Celsius por minuto con una tolerancia de ± 0.5 grados Celsius, llevando un registro de la temperatura y el tiempo cada minuto hasta que la muestra toque la placa inferior. Las temperaturas registradas no deben diferir entre sí en más de 1 grado Celsius.
- En el caso de que el cemento asfáltico cuyo punto de ablandamiento sea mayor a 80 grados Celsius, se debe de repetir el mismo procedimiento antes descrito, pero con la utilización de glicerina y una temperatura de acondicionamiento de 32 grados Celsius.

3.3.2. Análisis de resultados

Para realizar esta prueba se toma una muestra y se colocan en los anillos según el procedimiento indicado anteriormente, de los datos obtenidos se promedia el valor de las temperaturas obtenidas. Cómo resultaba la prueba, la consistencia del asfalto a una temperatura de 47.23 grados Celsius, cede una deformación pasando de estado sólido a estado líquido de forma gradual. Este resultado es un indicador de que el asfalto fluye a esta temperatura.

Tabla 12.

Resultado a prueba de punto de ablandamiento

Muestra	Celsius (°C)	Fahrenheit (°F)
T1	47.14	116.85
T2	47.31	117.15
Promedio	47.23	117

Nota. Detalle del resultado de las muestras tomadas del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3.3. Conclusiones

Se logra determinar que el punto de ablandamiento es útil para la clasificación de los productos asfálticos, ya que es un valor que indica la tendencia del material a fluir cuando esté sometida a altas temperaturas, durante su vida útil. Este indicador es de mucha importancia para verificar la uniformidad de los lotes de asfaltos utilizados en planta de producción. Pudiendo tener uniformidad y consistencia en las temperaturas a fluir del cemento asfáltico a utilizar.

3.4. Ensayo de granulometría de los agregados sin asfalto (AASHTO T-11, T-27)

Este ensayo permite calcular el tamaño de las partículas de los agregados pudiendo controlar si se encuentra dentro de los límites permitidos, según las normas y especificaciones indicadas mediante el paso de las partículas a través de una serie de mallas con aberturas determinadas.

3.4.1. Procedimiento

Para la correcta ejecución del ensayo de granulometría, el equipo empleado para la ejecución de esta prueba debe estar en óptimas condiciones de operación, así como su correcta calibración y limpieza, ya que todos estos factores dependen del tipo de material a ensayar, para ello es necesario que el equipo cuente con todas sus partes.

El equipo empleado para este ensayo se detalla de la siguiente manera:

- Tamices
 - Tapa
 - 1"
 - 3/4"
 - 1/2"
 - 3/8"
 - No. 4
 - No. 8
 - No. 50
 - No. 200
 - Fondo
- Tamizadora
- Balanza con precisión de 0.1 gramos
- Cepillo con cerdas metálicas
- Recipientes
- Brochas
- Horno

- Estufa eléctrica
- Cronometro

A continuación, se detalla el procedimiento del ensayo:

- Tomando en cuenta el tipo de material que se quiere ensayar, se procede a armar la serie de juego de tamices. Estas, se hacen en orden según el tipo de mezcla a ensayar.
- Se procede a seleccionar una cierta cantidad de material la cual es lavada y pasada por el tamiz No. 200 para que los finos del material no se pierdan.
- Después de haber lavado el material se procede a secarlo en un horno, de tal manera que este material pierda toda su humedad.
- Luego se extrae el material del horno se deja reposar en temperatura ambiente.
- Se arma la serie de tamices de la siguiente manera:
 - Tapa
 - 1"
 - 3/4"
 - 1/2"
 - 3/8"
 - No. 4
 - No. 8
 - No. 50
 - No. 200

- Fondo
- Luego de haber armado la serie de tamices se procede a colocar el material en el mismo, para posteriormente ser tamizada durante 12 minutos.
- Pasado los 12 minutos se procede a calcular los pesos retenidos en cada tamiz.

Las imágenes que se muestran enseguida dan a conocer el proceso de este ensayo.

Figura 5.

Lavado del agregado



Nota. La imagen muestra el proceso de lavado del material, el cual se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 6.

Agregado listo para ser tamizado



Nota. La imagen muestra el material procesado para luego ser tamizado, este se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 7.

Tamizado de agregados



Nota. La imagen muestra el material siendo tamizado, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

3.4.2. Análisis de resultado

Se determina que la granulometría es uniforme, ya que los resultados obtenidos se encuentran dentro de los límites especificados los cuales hacen que esté dentro del rango.

3.4.3. Conclusiones

La granulometría representa un parámetro de mucha importancia en las mezclas asfálticas en caliente, ya que esto es dependiente del tipo de mezcla o material ensayado.

- La distribución de las partículas de los agregados puede verse afectada cuando no se hace un buen fraccionamiento de los agregados, haciendo que la mezcla quede alterada.
- La segregación del muestreo en planta es la que influye si una mezcla es muy fina o gruesa.
- Es de suma importancia tomar en cuenta que el ensayo debe ser realizado con el material lavado y libre de humedad para que los resultados sean los más precisos posibles.
- Se debe hacer un buen fraccionamiento de la mezcla antes de su ensayo para tener una granulometría ideal.
- Para obtener el mejor resultado en la prueba de granulometría se deben de limpiar bien los tamices para poder tener el material exacto retenido en cada tamiz. al momento de pesar.

3.5. Ensayo de gravedad específica teórica máxima del concreto asfáltico en caliente (Método RICE, AASHTO T- 209, ASTM D-2041)

Este ensayo también es conocido como gravedad específica Rice, esto debido a que el autor de dicho ensayo se llama James Rice. Tiene como objetivo determinar la gravedad específica de una mezcla asfáltica en caliente cuando está en su estado suelto, eliminando la presencia de vacíos.

El peso específico es la relación entre el peso de una sustancia conocida, en este caso el del agua a una temperatura de 25 grados Celsius con el peso de un volumen dado de material a la misma temperatura.

3.5.1. Procedimiento

Para la correcta ejecución del ensayo de gravedad específica Rice, el equipo empleado para la ejecución de esta prueba debe estar en óptimas condiciones de operación, así como su correcta calibración y limpieza, para ello es necesario que el equipo cuente con todas sus partes.

El equipo empleado para este ensayo se detalla de la siguiente manera:

- Picnómetro de vacío, con capacidad de 2,000 gramos
- Balanza electrónica
- Vibrodesairador
- Bomba de vacíos el cual debe estar acoplado al picnómetro para la correcta extracción de vacíos de aire en la mezcla.
- Agua limpia a 25 grados Celsius.

La siguiente lista detalla el procedimiento del ensayo:

- Se procede a tomar una muestra de $1,000 \pm 200$ gramos de mezcla asfáltica dejándolo a temperatura ambiente y desgranada para evitar generar burbujas de vacíos dentro de ellas.
- Se pesa el picnómetro vacío.
- Se pesa el picnómetro completamente lleno de agua.
- Se agrega el material de la mezcla asfáltica al picnómetro.
- Luego se llena el picnómetro a $3/4$ del volumen del mismo y se coloca en la base del Vibrodesairador.
- Se arma todo el sistema y se pone a funcionar en conjunto con la bomba de vacíos en un tiempo de 15 minutos.
- Después del periodo de Vibrodesairador, se procede a llenar completamente el picnómetro y se procede a pesar el picnómetro junto con la mezcla y el agua para luego anotar el dato.

Enseguida se muestran las imágenes del proceso de este ensayo.

Figura 8.

Muestra de material a temperatura ambiente y desgranado



Nota. La imagen muestra el material desgrado a temperatura ambiente, realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 9.

Agregado de mezcla asfáltica al picnómetro



Nota. La imagen muestra la colocación de la mezcla en el equipo de laboratorio, esta se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 10.

Llenado del picnómetro a 3/4 del volumen



Nota. La imagen muestra el llenado del equipo de laboratorio con agua a temperatura ambiente, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 11.

Armado del picnómetro en conjunto con la bomba de vacíos



Nota. La imagen muestra el armado del equipo de laboratorio, este se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 12.

Periodo de Vibrodesairador



Nota. La imagen muestra el periodo de funcionamiento del equipo de laboratorio, el cual se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 13.

Llenado completamente del picnómetro



Nota. La imagen muestra el aforo de agua a temperatura ambiente del equipo de laboratorio, que se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 14.

Peso del picnómetro junto con la mezcla y el agua



Nota. La imagen muestra el proceso de pesado del equipo de laboratorio conjunto al material de la mezcla, el cual se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

3.5.2. Análisis de resultado

El resultado de la gravedad específica Rice (Gmm), en este trabajo se diseñaron tres ensayos con diferentes porcentajes de polipropileno (PP), para poder determinar los diferentes resultados en función de la cantidad del polipropileno en la mezcla asfáltica.

Con este resultado se determina el resultado real de vacío de aire en la mezcla. El resultado de este ensayo sirve como un indicador el cual es comparado con una mezcla con el contenido óptimo de asfalto, el cual varía a razón de mayor cantidad de polipropileno, menor es la densidad, esto quiere decir

que el polipropileno es muy absorbente haciendo que mejore el rendimiento de aplicación con la misma cantidad de una mezcla sin polipropileno.

3.5.3. Conclusiones

Mediante este ensayo se obtienen los vacíos reales del diseño de la mezcla, también se puede obtener el porcentaje óptimo de asfalto para las mezclas asfálticas en caliente.

3.6. Gravedad específica del concreto asfáltico compactado (Método Bulk, AASHTO T 166-05)

Es un procedimiento también llamado como densidad específica o (Bulk) (Gmb), este procedimiento se puede emplear rápidamente en especímenes que tienen una temperatura ambiente, este ensayo se hace con los requisitos de la norma AASHTO T 166-05; esta distingue la densidad específica neta para el agregado pétreo total que componen la mezcla asfáltica. Esta relaciona la masa de un volumen dado de material asfáltico y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura igual.

3.6.1. Procedimiento

El cálculo comienza a partir de la relación que hay entre el peso y la muestra seca al aire y la diferencia entre el peso de la muestra saturada de agua y el peso de la muestra sumergida en el agua a temperatura ambiente. Esta densidad representa la densidad que debe tener una mezcla colocada en campo.

Para la correcta ejecución del ensayo Bulk, el equipo empleado para la ejecución de esta prueba debe estar en óptimas condiciones de operación, así

como su correcta calibración y limpieza del anillo de compactación para las briquetas a realizar, para ello es necesario que el equipo cuente con todas sus partes.

El equipo empleado para este ensayo se detalla de la siguiente manera:

- Balanza electrónica
- Pedestal de compactación
- Moldes de compactación
- Mazo de compactación
- Tanque de agua a temperatura ambiente
- Termómetro
- Vernier
- Paño para secado de briquetas

La siguiente lista detalla el procedimiento del ensayo:

- Como primer paso para la elaboración de las briquetas se debe hacer una correcta dosificación según el diseño propuesto para la elaboración de las briquetas.
- Luego se procede a hacer la elaboración de las briquetas con la correcta dosificación, para ello se mezcla en una estufa eléctrica especial a una temperatura mayor a 270 grados Fahrenheit y no debe exceder una temperatura de 290 grados Fahrenheit.
- Se procede a hacer una correcta mezcla de los materiales durante un periodo aproximado de 6 minutos.

- Cuando se tiene una temperatura en el rango indicado se procede a extraer la muestra y colocarla sobre el collarín previamente engrasado para evitar que se pegue la mezcla sobre el mismo.
- Luego se procede a apisonar la mezcla con una espátula durante 25 veces.
- Posterior a ser apisonado, se procede a dar 75 golpes por cada cara de la pastilla a manera que sean homogéneo el periodo de compactación.
- Posterior a ello se procede a dejar a temperatura ambiente las pastillas, para luego ser sometidas al ensayo Bulk.
- Pasado 24 horas, se desencofra la briqueta mediante un gato hidráulico y se procede a medir el espesor de la muestra con un vernier tomando 3 medidas y luego se saca el promedio de ellas.
- Se pasa la briqueta a una balanza calibrada la cual indicará el (peso al aire).
- Después se pesa la briqueta totalmente sumergida en agua a temperatura ambiente para poder obtener el (peso en agua).
- Luego se seca la briqueta superficialmente con un paño y se vuelve a pesar para poder obtener el (peso seco saturado).
- Posterior a ello se procede a hacer los cálculos para obtener la densidad por medio del principio de Arquímedes (volumen por desplazamiento de agua).

- Se toma la temperatura del agua con el termómetro para poder obtener la corrección de la gravedad específica

Las siguientes imágenes muestran el proceso del ensayo.

Figura 15.

Mezcla homogénea según dosificación de briqueta a ensayar



Nota. La imagen muestra la temperatura a la que se están mezclando los materiales constituidos, siendo realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 16.

Engrasado de collarín para colocación de mezcla



Nota. La imagen muestra la preparación del equipo de laboratorio, el cual se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 17.

Compactación de briquetas con mazo y pistón



Nota. La imagen muestra la manipulación del equipo de laboratorio, siendo realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 18.

Briquetas con diferentes porcentajes de polipropileno



Nota. La imagen muestra los diferentes puntos a ensayar, y se realizaron en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 19. *Peso de briquetas al aire*



Nota. La imagen muestra la manipulación del equipo de laboratorio, este se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 20.

Peso de briquetas en agua



Nota. La imagen muestra la manipulación de las briquetas haciendo uso del equipo de laboratorio, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 21.

Peso de briquetas en estado seco saturado



Nota. La imagen muestra el secado de las briquetas usando el equipo de laboratorio, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

3.6.2. Cálculos

Para poder determinar la gravedad específica de la mezcla compactada se debe dividir el peso en aire de la briqueta en estado seco entre el producto del volumen y su factor de corrección.

Datos:

- W_s = Peso de la muestra en estado seco expresado en gramos
- $W_{agua\ sss}$ = Peso de la muestra en agua en estado saturado superficialmente seco expresado en gramos.
- $W_{aire\ sss}$ = Peso de la muestra en aire en estado saturado superficialmente seco expresado en gramos.
- S_{ss} = Saturado superficialmente seco.
- G_{mb} = Gravedad específica de la mezcla compactada expresada en gramos sobre centímetros cúbicos.
- $F_{temp\ k}$ = Factor de corrección por temperatura del agua.
- $V_{volumen}$ = $(W_{aire\ sss} - W_{agua\ sss})$ expresada en centímetros cúbicos.
- V_{sc} = Volumen sin corregir.
- V_{corr} = Volumen corregido.

Los factores de corrección de temperatura del agua se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 13.

Factores de corrección por temperatura del agua

Temperatura, (°C)	Densidad absoluta del agua	Factor de Corrección K
10	0.999728	1.002661
11	0.999634	1.002567
12	0.999526	1.002458
13	0.999406	1.002338
14	0.999273	1.002204
15	0.999129	1.002060
16	0.998972	1.001903
17	0.998804	1.001734
18	0.998625	1.001555
19	0.998435	1.001364
20	0.998234	1.001162
21	0.998022	1.000950
22	0.997801	1.000728
23	0.997569	1.000495
24	0.997327	1.000253
25	0.997075	1.000000
26	0.996814	0.999738
27	0.996544	0.999467
28	0.996264	0.999187
29	0.995976	0.998898
30	0.995678	0.998599

Nota. Tabla de que muestra los factores de corrección para la elaboración de los ensayos. Obtenido de P. Cox (2015). *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente.* (p. 58). PC.

Con los datos recolectados de pesos y tomando en cuenta el factor de corrección por temperatura del agua a 24 grados Celsius se determina el volumen corregido como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 14.*Datos de pesos y volumen de briquetas Marshall*

Porcentaje PP	No.	Ws	Wagua sss	Waire sss	Ftemp K 24 °C	Vsc	Vcorr
0	1	1242	732	1245	1.000253	513	513.1298
	2	1243	733	1246	1.000253	513	513.1298
0.5	3	1237	715	1245	1.000253	530	530.1341
	4	1237	714	1246	1.000253	532	532.1346
1	5	1242	704	1256	1.000253	552	552.1397
	6	1236	702	1249	1.000253	547	547.1384
1.5	7	1238	694	1259	1.000253	565	565.1429
	8	1234	692	1255	1.000253	563	563.1424

Nota. Detalle de datos obtenidos del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Con los datos obtenidos se logra determinar la gravedad específica mediante la siguiente fórmula:

$$Gmb = \frac{Ws}{(Waire\ sss - Wagua\ sss) * Ftemp}$$

Al finalizar el ensayo se determina la gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada, se reporte el resultado del promedio de la gravedad específica de las briquetas con diferentes porcentajes de polipropileno.

Tabla 15.

Resultado de gravedad específica de mezclas compactadas

Porcentaje PP	No.	Gmb	Gmb promedio
0	1	2.4204	2.4214
	2	2.4224	
0.5	3	2.3334	2.3290
	4	2.3246	
1	5	2.2494	2.2542
	6	2.2590	
1.5	7	2.1906	2.1909
	8	2.1913	

Nota. Detalle de datos obtenidos del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.6.3. Análisis de resultado

Mediante los resultados obtenidos del ensayo de gravedad específica bulk, se deben de comprobar la diferencia con los resultados de diseño, ya que la gravedad específica en la mezcla compactada puede afectar en el porcentaje de vacíos de la misma. Se logra determinar que la gravedad específica de la mezcla compactada cumple, esto debido a que la diferencia entre el resultado de este ensayo varía considerablemente con el resultado de diseño, de lo contrario se debe verificar la compactación y temperatura de la mezcla, puesto que estos son factores determinantes en los resultados obtenidos.

3.6.4. Conclusiones

Mediante los resultados obtenidos se demuestra que la gravedad específica de la mezcla compactada depende esencialmente de la temperatura y la buena compactación de cada briqueta.

- Se determina que, a mayor temperatura de compactación, mayor será la gravedad específica de la mezcla compactada, esto se debe a que su peso se mantiene constante, aunque el volumen se reduce al evacuar los vacíos de aire.
- Mediante este ensayo se determina la densidad de compactación que tiene la mezcla asfáltica relacionando su peso con el volumen.
- Es fundamental que al momento de compactar la temperatura establecida sea la adecuada para que los resultados no tengan discrepancia, ya que estos no pueden verse alterados con respecto al diseño.

3.7. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall (AASHTO T-245, ASTM D-6927)

Este ensayo tiene como objetivo medir la resistencia a la deformación de la mezcla y la fluencia mide la deformación. La estabilidad de Marshall es una medida de carga bajo la cual el espécimen cede totalmente o falla por la deformación producida por la carga efectuada.

3.7.1. Procedimiento

Para la correcta ejecución del ensayo de Marshall, el equipo empleado para la ejecución de esta prueba debe estar en óptimas condiciones de operación, así como su correcta calibración y limpieza del anillo de la maquina Marshall, para ello es necesario que el equipo cuente con todas sus partes. De igual manera el dial de la maquina debe estar calibrado para que la carga traducida a la briqueta, muestre la lectura correcta.

El equipo empleado para este ensayo se detalla de la siguiente manera:

- Cronómetro
- Sujetador de briquetas
- Baño de María
- Máquina de compresión Marshall
- Dial el medidor de flujo

A continuación, se detalla el procedimiento del ensayo:

- Posterior a ser sometidas al ensayo de gravedad específica Bulk, se toman los datos del espesor de las briquetas.
- Luego se deja en reposo las briquetas en un baño de María durante 35 minutos a una temperatura de 140 grados Fahrenheit.
- Pasados los 35 minutos se procede a colocar las briquetas sobre la maquina Marshall para posteriormente ser sometidas a compresión.
- Se toma lectura del dial de medición de carga, así como también se hace la medición del flujo de la briqueta.
- Después de ensayar la briqueta se procede a calcular la estabilidad de la mezcla de las briquetas según sus dosificaciones.

Las imágenes que se muestran enseguida, dan a conocer el proceso de este ensayo.

Figura 22.

Briquetas en baño de María



Nota. La imagen muestra la manipulación de las briquetas haciendo uso del equipo de laboratorio, y realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 23.

Colocación de briquetas y lectura del dial de carga y de flujo



Nota. La imagen muestra la manipulación de las briquetas haciendo uso del equipo de laboratorio, y realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 24.

Lectura del dial de carga y fluencia



Nota. La imagen muestra el ensayo de Marshall sobre las briquetas realizadas para investigación, realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

3.7.2. Cálculos

Para poder determinar el valor de la estabilidad Marshall se debe hacer un cálculo del valor de fluencia de las briquetas, estas se hacen a partir de las lecturas del dial al de carga el cuál es introducido en la ecuación de estabilidad que se muestra a continuación.

Datos:

Ldc = Lectura del dial de carga

Ldf = Lectura del dial que indica la fluencia en 0.01 pulgadas

Fvol = Factor de corrección por volumen de briquetas

Ecuación de estabilidad según la calibración de la máquina Marshall.

$$\text{Estabilidad} = (\text{Ldc} * 7.4736 + 11.1604) * \text{Fvol}$$

Tomando como factor de corrección por volumen, se toma el rango de los volúmenes de las briquetas, que van según la tabla de correcciones, dichos factores se encuentran en la siguiente tabla:

Tabla 16.*Factores de corrección de estabilidad*

Volumen de Especimen, cm³	Espesor Aproximado de Especimen, pulg.	mm	Razón de correlación
200 a 213	1	25.4	5.56
214 a 225	1 1/16	27.0	5.00
226 a 237	1 1/8	28.6	4.55
238 a 250	1 3/16	30.2	4.17
251 a 264	1 ¼	31.8	3.85
265 a 276	1 5/16	33.3	3.57
277 a 289	1 3/8	34.9	3.33
290 a 301	1 7/16	36.5	3.03
302 a 316	1 ½	38.1	2.78
317 a 328	1 9/16	39.7	2.50
329 a 340	1 5/8	41.3	2.27
341 a 353	1 11/16	42.9	2.08
354 a 367	1 ¾	44.4	1.92
368 a 379	1 13/16	46.0	1.79
380 a 392	1 7/8	47.6	1.67
393 a 405	1 15/16	49.2	1.56
406 a 420	2	50.8	1.47
421 a 431	2 1/16	52.4	1.39
432 a 443	2 1/8	54.0	1.32
444 a 456	2 3/16	55.6	1.25
457 a 470	2 ¼	57.2	1.19
471 a 482	2 5/16	58.7	1.14
483 a 495	2 3/8	60.3	1.09
496 a 508	2 7/16	61.9	1.04
509 a 522	2 ½	63.5	1.00
523 a 535	2 9/16	65.1	0.96
536 a 546	2 5/8	66.7	0.93
547 a 559	2 11/16	68.3	0.89
560 a 573	2 ¾	69.9	0.86
574 a 585	2 13/16	71.4	0.83
586 a 598	2 7/8	73.0	0.81
599 a 610	2 15/16	74.6	0.78
611 a 625	3	76.2	0.76

Nota. Tabla de que muestra los factores de corrección para la elaboración de los ensayos. Obtenido C. Castañeda, G. Escobar & L. López (2011). *Aplicación del método Marshall y granulometría superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica.* (https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2079/1/Aplicacion_del_metodo_marshall_y_granulometria_superpave_en_el_dise%C3%B1o_demezcla_asfaltica_templada_con_emulsion_asfaltica.pdf), consultado el 20 de Julio de 2023. De dominio público.

Tabla 17.*Datos de estabilidad y fluencia Marshall*

Marshall									
Porcentaje Polipropileno	Briquetas	Carga (Ldc)	Espesor (h) (cm)	Fvol.	Fluencia (Ldf)	Volumen (cm ²)	Estabilidad corregida (Lbs)	Promedio de estabilidad (Lbs)	Estabilidad / Fluencia
0	1	330	6.35	1.00	11	515	2,478.27	2,384.96	207
	2	305	6.38	1.00	12	517	2,291.65		
0.5	3	405	6.95	0.86	16	563	2,613.62	2,645.85	171
	4	415	6.98	0.86	15	566	2,678.08		
1	5	421	7.10	0.83	18	576	2,620.76	2,697.69	154
	6	430	7.00	0.86	17	568	2,774.62		
1.5	7	470	7.28	0.81	19	590	2,855.57	2,795.04	143
	8	450	7.30	0.81	20	592	2,734.50		

Nota. Detalle de datos obtenidos del proyecto de investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

De los resultados se toma en cuenta el promedio del valor de la estabilidad de las dos briquetas ensayadas de la misma muestra, de igual manera se tomó como resultado final el promedio de la fluencia de dichas briquetas.

3.7.3. Análisis de resultado

Con los valores obtenidos de la tabla anterior se determina que los resultados del ensayo cumplen con las especificaciones, ya que la estabilidad debe ser mayor a 1,200 libras y la fluencia se debe encontrar en el rango de 120

a 275, por lo tanto, los resultados cumplen con las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos.

Tabla 18.

Requisitos para la mezcla de concreto asfáltico

METODO 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)	Tabla 401-13	
• 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. La tabla muestra los requisitos necesarios para el tipo de mezcla propuesto. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 401.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 20 de Julio de 2023. De dominio público.

3.7.4. Conclusiones

Los resultados de este ensayo sirven como un indicador si el diseño de mezcla es rígido o blando, también el concepto de estabilidad Marshall busca relacionar la estabilidad con la fluencia, definido como un módulo de rigidez. Por otro lado, se pretende determinar el contenido de asfalto óptimo para cada tipo

de mezcla evitando cualquier desplazamiento o ahuellamiento prematura cuando se somete al tráfico.

- Si la mezcla presenta una alta resistencia a la carga y una baja relaciones estabilidad / flujo, se dice que la mezcla es muy rígida; de lo contrario, si la mezcla tiene una baja capacidad de carga y una alta relaciones estabilidad / flujo, se determina que la mezcla es muy flexible y presenta una fluencia alta.
- Teniendo en cuenta que las relaciones estabilidad / flujo representan la ductilidad o fragilidad de una mezcla, sus valores permiten predecir el comportamiento futuro de las mezclas bajo la acción de las cargas del tránsito o del medio ambiente.
- Los resultados que se obtienen de la estabilidad y la fluencia son debido a la dosificación del asfalto en las mezclas, a mayor contenido asfáltico en la mezcla, mayor será la fluencia que presente, esto debido a la viscosidad y la cohesión de los materiales, así como el porcentaje de vacíos influye en este resultado.

4. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE CON LA IMPLEMENTACIÓN DE FIBRAS DE POLIPROPILENO MEDIANTE MÉTODO DE MARSHALL

Para la combinación específica de agregados pétreos el método Marshall tiene como objetivo determinar el contenido óptimo de bitumen (Cemento asfáltico), para una combinación específica de agregados pétreos. El método de Marshall además de proporcionar datos sobre propiedades que deben tener las mezclas asfálticas también establece valores de densidad específica bruta y densidad teórica máxima, así como contenidos óptimos de vacíos requeridos y emplea la evaluación de pruebas de densidad de flujo Marshall en una probeta cilíndrica que deben ser cumplidos durante la realización de diseño en mezclas asfálticas en caliente.

Para el diseño de mezclas asfálticas en caliente con la reutilización de fibras de polipropileno se utiliza como base el método Marshall, ya que se encuentra dentro de las especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la dirección general de caminos, establecida en Guatemala ubicado en la sección 401 desde el 2001.

El método Marshall fue desarrollado y constituido por el ingeniero Bruce Marshall, quién fue parte del departamento de Autopistas del Estado de Mississippi.

El método fue originalmente aplicado a mezclas de asfálticas en caliente para pavimentos que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada) o menor. El método toma como base la realización de especímenes

(briquetas) estándares de 64 mm aproximadamente de altura y 102 mm de diámetro usado; se realizan mediante un procedimiento de combinación de materiales pétreos con materiales granulométricos, los cuales son mezclados y compactados bajo diferentes normas o estándares de preparación de los mismos tomando como base las normas (ASTM D1559) – (AASHTO T245).

El método Marshall tiene como objetivo principal determinar dos puntos importantes que son:

- Estabilidad - carga máxima expresada en Kilogramos que soporta una probeta.
- Fluencia - deformación total expresada en mm que experimenta la probeta a la aplicación de la carga máxima.

A continuación, se presenta la metodología del diseño a analizar.

4.1. Muestreo en banco de materiales

Para seleccionar la muestra a utilizar en el banco de materiales se debe de realizar una selección específica de la muestra, la cual es extraída mediante un cargador, el cual recoge el material y lo deposita en recipientes de muestreo. La muestra proviene del banco de materiales “Trituradora ALPE S.A.”, la cual fue seleccionada por sus estándares de calidad con la cual cuentan.

Figura 25.

Muestra del agregado



Nota. La imagen muestra el material para la elaboración de las briquetas para investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

4.2. Identificación de materiales según tipo de mezcla a diseñar

En Guatemala existen una serie de tipos de mezclas asfálticas en caliente las cuales se clasifican según el tamaño del agregado, porcentaje de asfalto que se usan en ellas y el uso recomendado.

En la siguiente tabla se muestra los diferentes tipos de mezclas asfálticas más usadas tomando como base las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Tabla 19.

Tipos de mezclas asfálticas

TIPO DE MEZCLA	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO	RANGO DE PORCENTAJE DE CEMENTO ASFALTICO A UTILIZAR	USOS RECOMENDADOS
<i>D</i>	19.0 mm (3/4")	4 - 10 %	Avenidas principales, Autopistas y Calzadas
<i>E</i>	12.5 mm (1/2")	4 - 11 %	Uso General
<i>F</i>	9.5 mm (3/8")	5 - 12 %	Condominios, Parques y Residenciales

Nota. Muestra los diferentes tipos de mezcla con relación a sus usos recomendados. Elaboración propia, realizado con Excel.

Los bancos de materiales ofrecen una amplia gama de materiales y se caracterizan por su tipo de granulometría, entre ellos se encuentran los siguientes materiales comerciales:

- 1/2" a 0
- 1/2 a 7
- 1/4" a 0
- 3/4" especial
- 3/8"
- 3/8" a No.8

- 1" a No.56
- 1"
- 1" – 0
- Arena de río

Cada uno de estos materiales tiene su propia granulometría según su tamaño máximo nominal, así como el tipo de aplicación de los mismos.

Para el diseño propuesto de esta mezcla asfáltica modificada, se utilizará como base la mezcla tipo "E" (12.5 mm) 1/2". Para realizar la combinación de los agregados se usarán los siguientes agregados:

Tabla 20.

Agregados para el diseño de la mezcla

AGREGADO	BANCO	DISTRIBUIDOR
1/4" a 0	Trituradora ALPE S.A.	PADEGUA
3/8" a No 8	Trituradora ALPE S.A.	PADEGUA
1/2" A 7	Trituradora ALPE S.A.	PADEGUA

Nota. Muestra los diferentes tipos de agregados utilizados para la realización de la investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.3. Características de los agregados

Para la realización del diseño de la mezcla asfáltica propuesta, se deben conocer ciertos requerimientos para que los agregados cumplan con las especificaciones según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala, las cuales se indican de la siguiente manera:

- Determinación del peso específico de los agregados
- Análisis granulométrico (AASHTO T-11)
- Prueba de abrasión de Los Ángeles (AASHTO T-96)
- Desintegración al sulfato de sodio (AASHTO T-104)
- Equivalente de Arena (AASHTO T-176)
- Índice plástico (AASHTO T-90)
- Partículas planas y alargadas

4.4. Análisis granulométrico de los agregados (AASHTO T-11)

En la siguiente tabla se muestra el tamaño máximo nominal de cada tipo de mezcla, así como la abertura de los tamices requeridos para los porcentajes pasantes para un diseño de una mezcla tipo E (12.5 mm) ½" de pulgada.

Tabla 21.

Tipo de mezcla según la graduación granulométrica

Tamaño del 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 ½"	1"	¾"	½"	⅜"
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	-	56-80	-	90-100	100	
12.50 mm	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9.50 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

Nota. La tabla muestra las aberturas para cada tamiz. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 401.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 25 de Julio de 2023. De dominio público.

Para el siguiente diseño se procede a conocer el tamaño máximo nominal de cada uno de los agregados en estado seco (libre de humedad), por medio de una serie de tamices y de esta forma determinar su escala granulométrica.

A continuación, se muestra la granulometría de cada uno de los agregados:

- Agregado: 1/4" a 0
PN = 1,207.38 g

Tabla 22.

Granulometría de agregado 1/4" a 0

1/4" a 0			
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso bruto retenido	Porcentaje de peso pasante
1"	25.00	182.55	100.00
3/4"	19.00	182.55	100.00
1/2"	12.50	182.55	100.00
3/8"	9.50	182.55	100.00
No. 4	4.75	257.06	93.83
No. 8	2.36	635.51	62.48
No. 50	0.29718	1,138.91	20.79
No. 200	0.07366	1,242.81	12.18

Nota. Muestra los diferentes valores obtenidos de la realización de la investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

- Agregado: 3/8" a No. 8
PN = 993.11 g

Tabla 23.*Granulometría de agregado 3/8" a No. 8*

3/8" a No. 8			
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso bruto retenido	Porcentaje de peso pasante
1"	25.00	182.43	100.00
3/4"	19.00	182.43	100.00
1/2"	12.50	182.43	100.00
3/8"	9.50	241.97	94.01
No. 4	4.75	1,095.81	8.03
No. 8	2.36	1,134.01	4.18
No. 50	0.29718	1,149.97	2.58
No. 200	0.07366	1,154.95	2.08

Nota. Muestra los diferentes valores obtenidos de la realización de la investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

- Agregado: 1/2" A 7
PN = 1,198.95g

Tabla 24.*Granulometría de agregado 1/2" A 7*

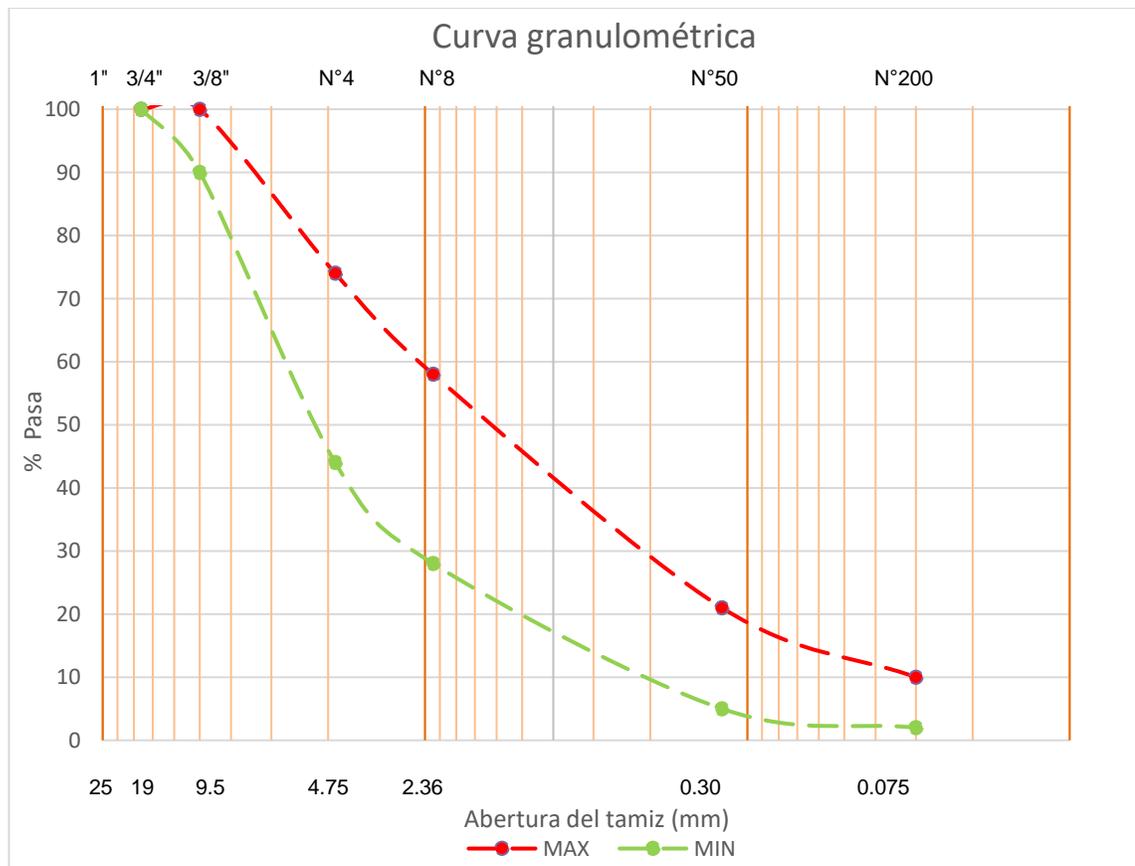
1/2" A 7			
Tamiz	Diámetro (mm)	Peso bruto retenido	Porcentaje de peso pasante
1"	25.00	197.89	100.00
3/4"	19.00	197.89	100.00
1/2"	12.50	341.19	88.05
3/8"	9.50	960.81	36.37
No. 4	4.75	1,360.81	3.01
No. 8	2.36	1,370.81	2.17
No. 50	0.29718	1,376.65	1.68
No. 200	0.07366	1,380.92	1.33

Nota. Muestra los diferentes valores obtenidos de la realización de la investigación. Elaboración propia, realizado con Excel.

Según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, se logra determinar los límites establecidos en dichas especificaciones los cuales se pueden observar de mejor manera en la curva granulométrica que se muestra a continuación.

Figura 26.

Gráfica de límites de graduación para una granulometría "E"

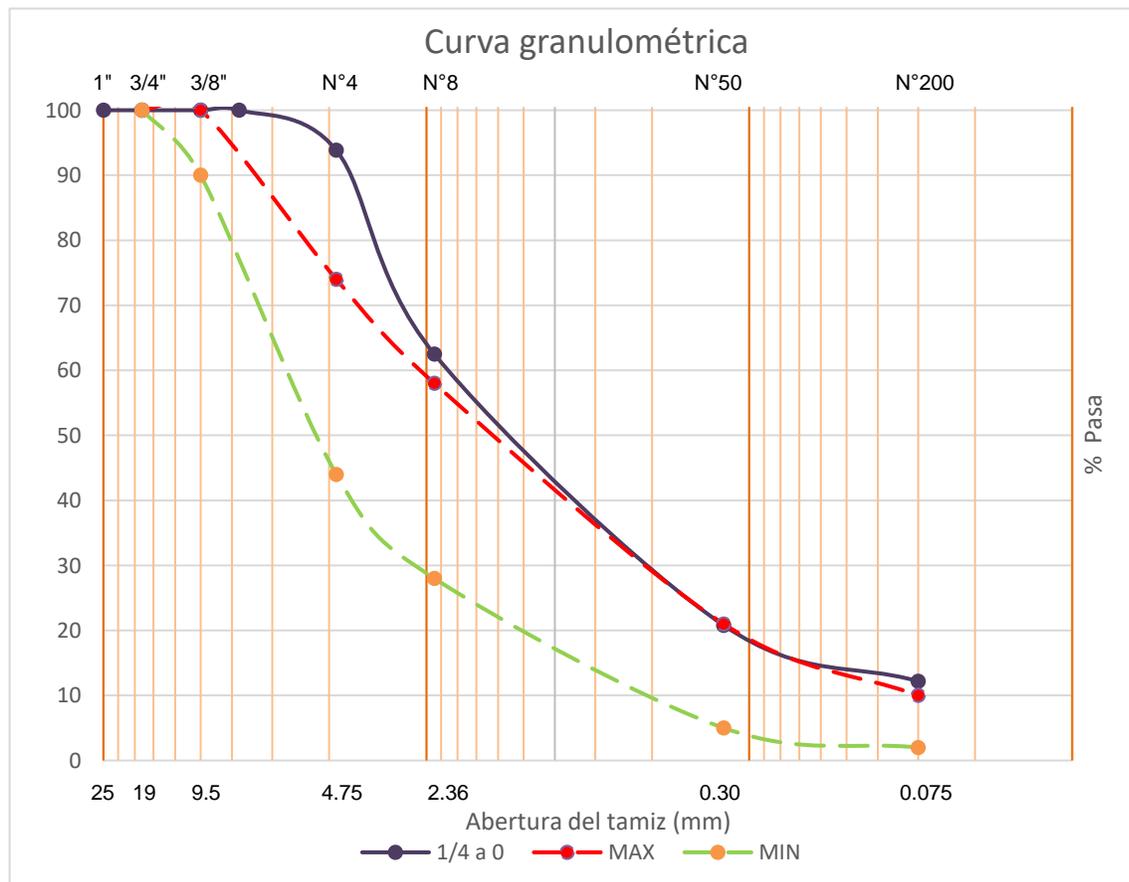


Nota. El gráfico muestra los valores límites para una muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

A continuación, se muestra la curva de granulométricas de cada agregado con respecto a los límites máximos y mínimos, según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos.

- Agregado: 1/4" a 0
PN = 1,207.38 g

Figura 27. Curva de granulométrica 1/4" a 0

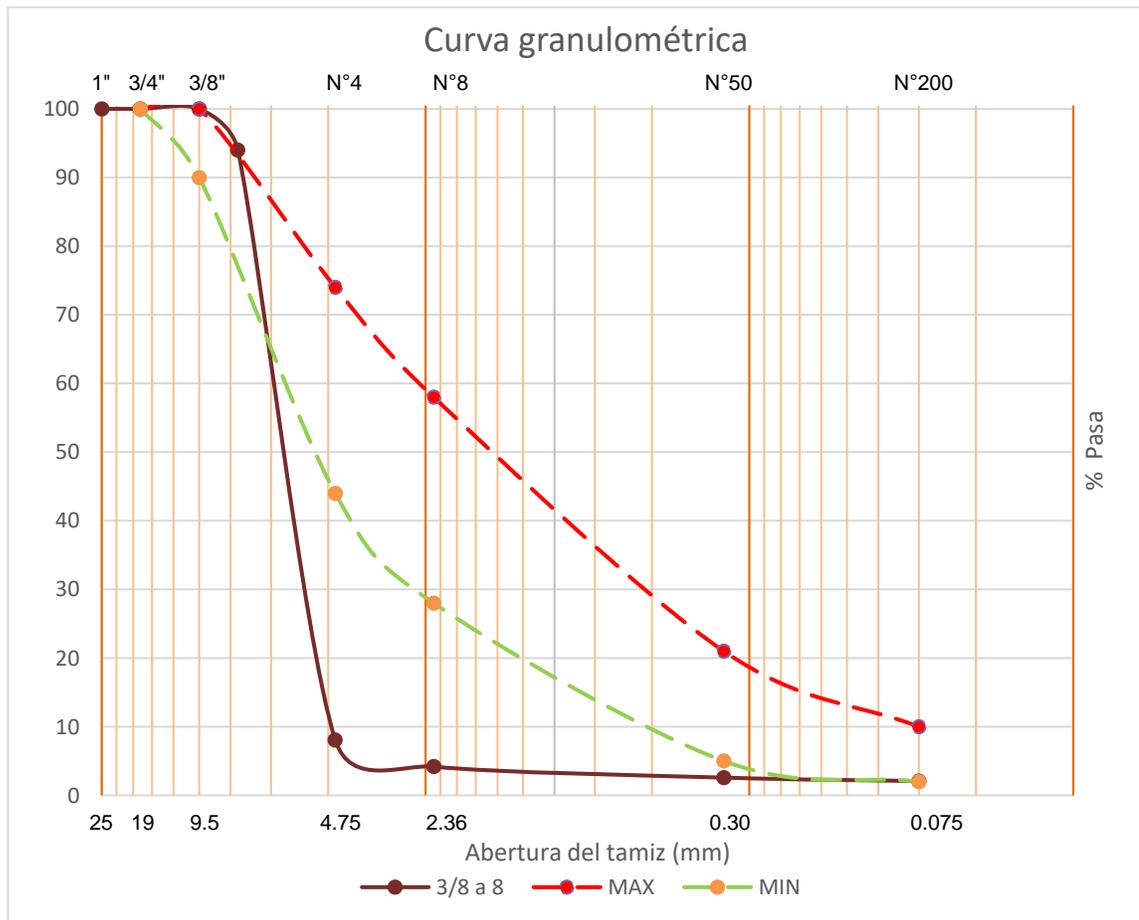


Nota. El gráfico muestra los valores fuera del límite para una muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

- Agregado: 3/8" a No. 8
PN = 993.11 g

Figura 28.

Curva de granulométrica 3/8" a No. 8

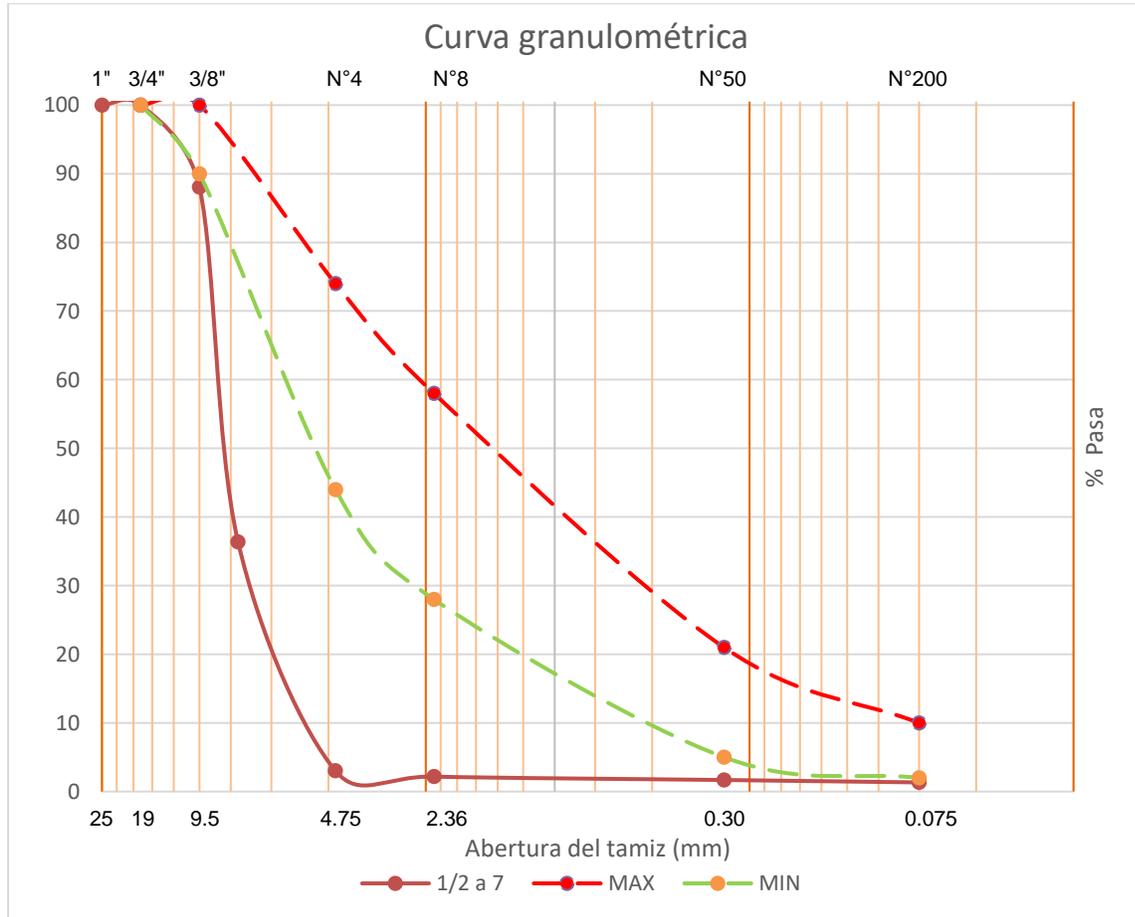


Nota. El gráfico muestra los valores fuera del límite para una muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

- Agregado: 1/2" A 7
PN = 1,198.95g

Figura 29.

Curva de granulométrica 1/2" A 7



Nota. El gráfico muestra los valores fuera de límite para una muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Conociendo los diferentes patrones de las curvas granulométricas de los diferentes agregados, se logra observar que ningún agregado cumple con los límites establecidos para una granulometría tipo E, Según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de

Caminos, para ello es necesario realizar una combinación de los agregados para realizar un diseño granulométrico el cual cumpla con la granulometría tipo E.

4.5. Combinación granulométrica de los agregados

Obteniendo la granulometría de cada agregado se procede a realizar la combinación granulométrica para llegar a la curva granulométrica deseada según el diseño propuesto, en la siguiente tabla se presenta la integración de cada una de las granulometrías.

Tabla 25.

Combinación granulométrica del diseño propuesto

TAMICES		COMBINACIONES DE AGREGADOS			PORCENTAJE TOTAL	ÓPTIMO	ESPECIFICACIONES	
Pulgadas	mm	1/4" a 0	3/8" N° 8	1/2" a 7			TIPO	
		60 %	20 %	20 %			E	
1"	25.00	60.00	20.00	20.00	100.00			
3/4"	19.00	60.00	20.00	20.00	100.00	100	100	100
1/2"	12.50	60.00	20.00	17.61	97.61	95	90	100
3/8"	9.50	60.00	18.80	7.27	86.08	-	-	-
No. 4	4.75	56.30	1.61	0.60	58.50	59	44	74
No. 8	2.36	37.49	0.84	0.43	38.76	43	28	58
No. 50	0.2971 8	12.47	0.52	0.34	13.32	13	5	21
No. 200	0.0736 6	7.31	0.42	0.27	7.99	6	2	10

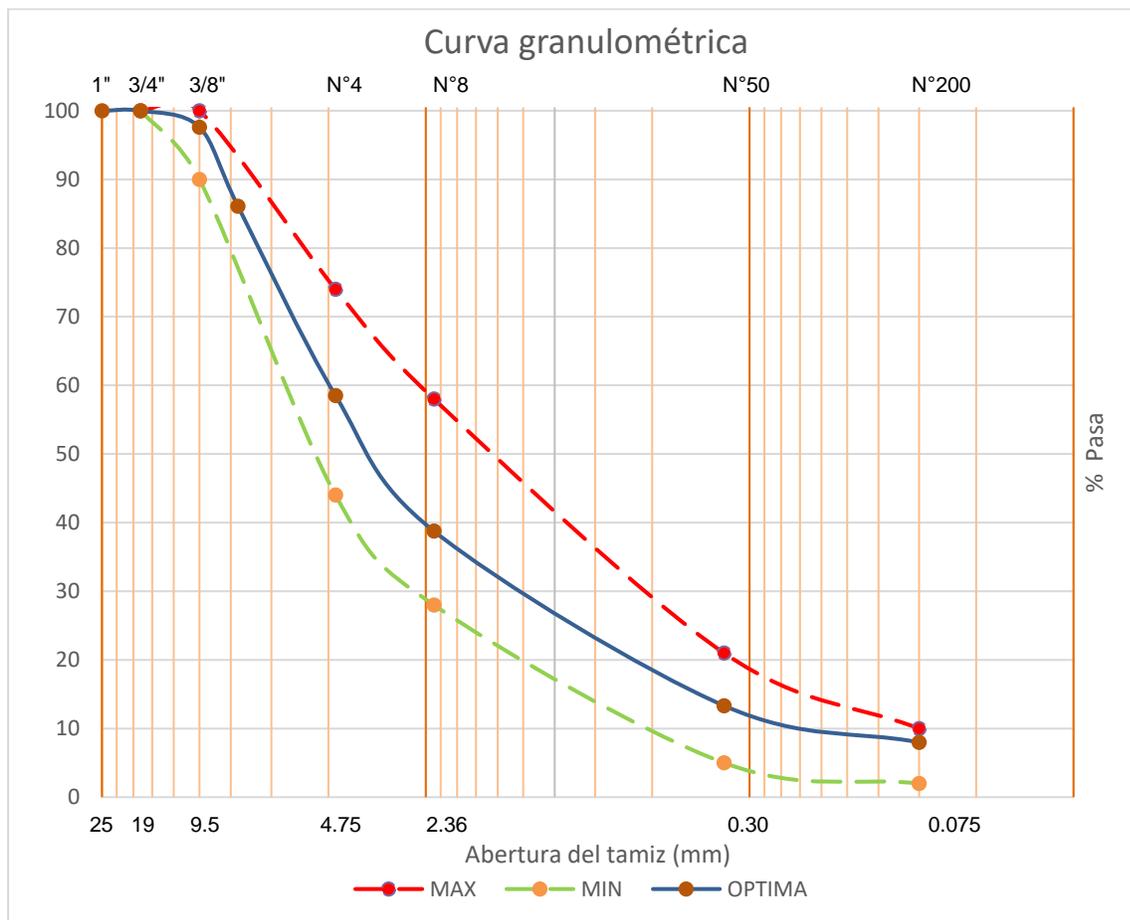
Nota. La tabla muestra los valores óptimos con referencia a los límites para una muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos, se logra determinar que la integración granulométrica cumple con los límites establecidos en dichas

especificaciones los cuales se pueden observar de mejor manera en la curva granulométrica que se muestra a continuación.

Figura 30.

Gráfico de combinación granulométrica de los agregados



Nota. El gráfico muestra los valores óptimos que están dentro de los límites para la elaboración de la muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.6. Porcentajes óptimo de asfalto presente en la mezcla de diseño

Mediante ensayos realizados por parte del Laboratorio de PROEQUIPOS S.A., se proporcionó el punto óptimo de asfalto, el cual con base a estudios granulométricos y ensayos previos se determinó de la siguiente manera para todos los puntos a realizar con diferentes porcentajes de polipropileno.

Tabla 26.

Porcentaje óptimo de asfalto a utilizar

Porcentaje AC-20
6.20 Porcentaje

Nota. La tabla muestra el valor óptimo de cemento asfáltico a utilizar. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.7. Porcentajes teóricos de polipropileno presente en la mezcla de diseño

Para establecer los porcentajes teóricos de polipropileno en la mezcla se debe conocer el porcentaje de peso de aporte establecido en la granulometría combinada para saber la cantidad de cada agregado a utilizar.

Los porcentajes establecidos quedan reflejados en la (tabla 27), los cuales se muestran a continuación.

Tabla 27.

Porcentajes teóricos de contenido de polipropileno

PUNTO	PORCENTAJE PP	PORCENTAJE AC-20	PORCENTAJE AGREGADO	PORCENTAJE TOTAL DE LA MEZCLA
1	0.00 %	6.20 %	93.80 %	100 %
2	0.00 %	6.20 %	93.80 %	100 %
3	0.50 %	6.20 %	93.30 %	100 %
4	0.50 %	6.20 %	93.30 %	100 %
5	1.00 %	6.20 %	92.80 %	100 %
6	1.00 %	6.20 %	92.80 %	100 %
7	1.50 %	6.20 %	92.30 %	100 %
8	1.50 %	6.20 %	92.30 %	100 %

Nota. La tabla muestra los contenidos de fibras plásticas a emplear para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

4.8. Dosificación de materiales para la elaboración de la mezcla asfáltica

Para la preparación de la mezcla se busca tener una cantidad de total de 1,240 gramos de asfalto, polipropileno y todos los agregados libres de suciedad y humedad por cada punto, en el siguiente cuadro se muestra la cantidad de material a utilizar.

Tabla 28.*Dosificación de materiales*

Agregados		PUNTO 1	PUNTO 2	PUNTO 3	PUNTO 4	PUNTO 5	PUNTO 6	PUNTO 7	PUNTO 8
		Porcentaje							
Material	Porcentaje	93.80 %	93.80 %	93.30 %	93.30 %	92.80 %	92.80 %	92.30 %	92.30 %
1/4" a 0	60.00 %	697.87	697.87	694.15	694.15	690.43	690.43	686.71	686.71
3/8" a No 8	20.00 %	232.62	232.62	231.38	231.38	230.14	230.14	228.90	228.90
1/2" A 7	20.00 %	232.62	232.62	231.38	231.38	230.14	230.14	228.90	228.90
PESO DE AGREGADO TOTAL A UTILIZAR		1,163.12	1,163.12	1,156.92	1,156.92	1,150.72	1,150.72	1,144.52	1,144.52
PORCENTAJE PP		0.00 %	0.00 %	0.50 %	0.50 %	1.00 %	1.00 %	1.50 %	1.50 %
PESO DE FIBRA DE PP		0	0	6.2	6.2	12.4	12.4	18.6	18.6
PORCENTAJE AC-20		6.20 %	6.20 %	6.20 %	6.20 %	6.20 %	6.20 %	6.20 %	6.20 %
PESO DE ASFALTO		76.88							
PESO TOTAL DE LA MEZCLA		1,240.00							

Nota. La tabla muestra la dosificación correcta de materiales para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

En el cuadro anterior se observa que para el punto 1 se utiliza 1,163.12 gramos de agregados (93.80 por ciento) y 76.88 gramos de AC-20 (6.20 por ciento) y 0 gramos de polipropileno (0 por ciento), los agregados están distribuidos de la siguiente manera: 697.87 gramos de 1/4"-0, 232.62 gramos de 3/8"-No.8 y 232.62 gramos de 1/2"-7; la sumatoria de los agregados, fibras de polipropileno y el AC-20 hacen un total de 1,240 gramos.

4.9. Maquinaria y equipo

Para la realización del ensayo de Marshall es necesario contar con el equipo adecuado, calibrado y en óptimas condiciones de uso.

A continuación, se detalla la maquinaria y equipo idóneo para la realización del ensayo.

- Una balanza calibrada para pesar los diferentes materiales y las probetas compactadas.
- Una batería de tamices.
- Un recipiente para mezclar
- Dos cucharones y dos espátulas.
- Un molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana, para moldear probetas.
- Un martillo de compactación de operación manual. Consiste en un
- Mazo de compactación o dispositivo de acero con una base plana circular de compactación con una articulación de resorte y un pisón deslizante de 4.54 kg de masa total, montado en forma que proporcione una altura de caída de $457.2 \pm 1,5$ mm.
- Un pedestal de compactación. Es una pieza prismática de madera de base cuadrada de 203.2 mm de lado y 457.2 mm de altura, provista en su cara superior con una platina cuadrada de acero de 304.8 mm de lado y 25.4 mm de espesor. Esta debe de estar firmemente sujeta al pedestal.
- Un dispositivo con resorte de tensión, diseñado para centrar rígidamente el molde de compactación sobre el pedestal. Debe de sostener en su posición el molde, el collar y la placa de base durante la compactación de la probeta.

A continuación, se muestran las imágenes del proceso de ensayo.

Figura 31.

Horno graduado usado para calentar los materiales y equipo



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, realizado en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 32.

Equipo utilizado para calentar la mezcla asfáltica



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 33.

Guantes, recipiente y espátula para mezclar



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 34.

Termómetros adecuados para medir temperatura



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 35.

Balanza para pesar los materiales



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, el cual se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 36.

Batería de tamices y tamizadora



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 37.

Molde con collar de extensión y placa para formar las probetas



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 38.

Martillo de operación manual y pedestal para compactación



Nota. La imagen muestra el equipo para la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

4.10. Descripción de la metodología para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica

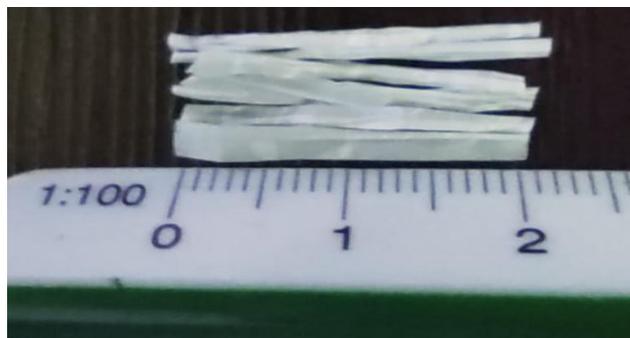
Para la elaboración de briquetas de mezcla asfáltica en caliente, se debe tener cuidado con las dosificaciones de peso de cada material a utilizar, para no alterar las proporciones tanto de la granulometría, el polipropileno o el asfalto.

Con los datos de dosificación de cada uno de los materiales a utilizar en cada punto según su porcentaje de polipropileno, se elaboran como mínimo 2 muestras por cada punto.

Para la correcta dosificación del porcentaje de fibras de polipropileno, es de suma importancia que las fibras sean homogéneas y se encuentren libres de cualquier materia orgánica, para que las fibras se encuentren uniformes se hicieron de una longitud nominal de $\frac{1}{3}$ de la altura de las probetas, la cual corresponde $\frac{1}{3}$ de 63.5 mm aproximadamente, ósea 21.17 mm o 2.12 cm.

Figura 39.

Longitud nominal de las fibras de polipropileno



Nota. La imagen muestra el material para la elaboración de la investigación, que se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Al momento de la dosificación es de precisa importancia contar con una balanza bien calibrada para que al momento de medir los pesos de cada material que contenga la probeta según dosificación sea lo más exacta posible, de igual manera es importante tener un peso exacto con las fibras de polipropileno, ya que por ser partículas muy livianas tienden a formar mucho volumen y poco peso, a continuación, se muestran los diferentes pesos de polipropileno según su porcentaje en la briqueta.

- Peso = 6.20 gramos para puntos 3 y 4

Figura 40.

0.5 % de fibras de polipropileno



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, que se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

- Peso = 12.40 gramos para puntos 5 y 6

Figura 41.

1.0 % de fibras de polipropileno



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

- Peso = 18.60 gramos para puntos 7 y 8

Figura 42.

1.5 % de fibras de polipropileno



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, que se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

4.11. Procedimiento para elaboración de la mezcla asfáltica

Al tener la medida de la cantidad de materiales a utilizar y la temperatura de cada material a usar para el diseño propuesto se procede a realizar la mezcla asfáltica de manera uniforme, evitando la creación de grumos, para ello se realiza de la siguiente manera.

- Sobre un recipiente se procede a pesar el material según dosificación de la combinación granulométrica.
- Teniendo el peso exacto para la briqueta según su punto propuesto se procede a verter el material sobre otro recipiente el cual soporta altas temperatura, este es puesto sobre la una plancha de calentamiento.
- Al momento de tener la temperatura deseada se procede a verter la cantidad deseada de cemento asfáltico, se procede a mezclar los materiales homogéneamente sin descuidar la temperatura.
- Luego de tener los agregados perfectamente mezclados con el cemento asfáltico se procede a verter la cantidad deseada según su punto de fibras de polipropileno, estas se mezclan homogéneamente durante 6 minutos a manera de tener una mezcla consistente.

Este proceso se realiza con su debido cuidado y con todas las medidas de seguridad especial, ya que los materiales se encuentran en altas temperaturas, los agregados y el cemento asfáltico deben de estar entre 300 a 350 grados Fahrenheit, en este caso la temperatura de mezclado es de 350 grados Fahrenheit. A continuación, se muestran figuras del proceso de mezclado.

Figura 43.

Peso de combinación de los agregados según su punto



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 44.

Mezclado de cemento asfáltico con los agregados



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, este se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 45.

Mezcla asfáltica en caliente con fibras de polipropileno



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, que se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

Figura 46.

Temperatura de mezclado



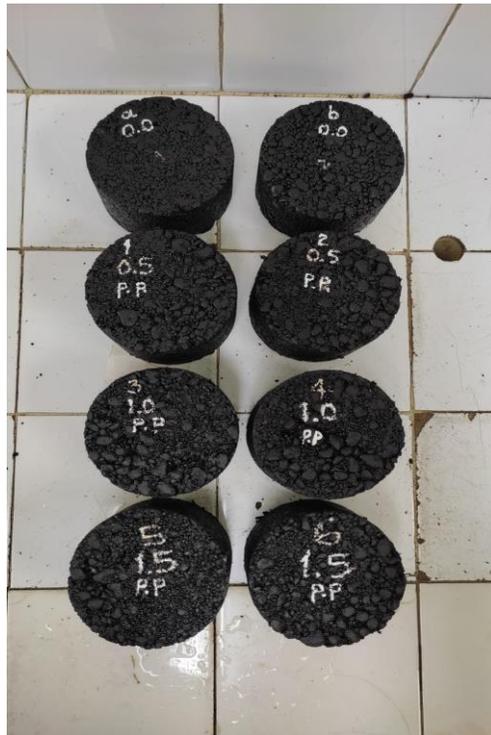
Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

4.12. Elaboración de las briquetas Marshall

Para la elaboración de las briquetas se debe mantener la mezcla debidamente homogénea y con una temperatura estable de 280 a 290 grados Fahrenheit, dicha mezcla es trasladada a los collarines (moldes), sobre el pedestal para posteriormente ser compactada con 75 golpes por cada lado, según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Figura 47.

Briquetas Marshall



Nota. La imagen muestra el proceso de la elaboración de la investigación, y se realizó en el Laboratorio Proequipos S.A. Elaboración propia.

A continuación, se muestra la tabla de especificaciones de compactación según las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala.

Tabla 29.

Parámetros de diseño Marshall

METODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	MINIMO	MAXIMO
1) MARSHALL (AASHTO T 245)		
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de compactación de pastilla para producir una viscosidad de 	0.25 Pa-s (250 cS)	0.31 Pa-s (310 cS)
<ul style="list-style-type: none"> • Número de golpes de compactación en cada extremo del espécimen ⁽²⁾ 	75	75
<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad 	5,338 N (1,200 libras)	
<ul style="list-style-type: none"> • Fluencia en 0.25 mm (0.01 pulg.) <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL 	8	16
	8	14
<ul style="list-style-type: none"> • Relación Estabilidad/Fluencia (lb./0.01 pulg.) 	120	275
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾ 	3	5
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM) 	Tabla 401-13	
<ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto <ul style="list-style-type: none"> • Tránsito < 10⁶ ESAL • Tránsito > 10⁶ ESAL 	65	78
	65	75
<ul style="list-style-type: none"> • Relación finos/bitumen⁽⁴⁾ 	0.6	1.6
<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilidad a la humedad AASHTO T 283 	80 %	
<ul style="list-style-type: none"> • Resistencia retenida 		
<ul style="list-style-type: none"> • Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado, AASHTO T 195 	95 %	

Nota. La tabla muestra los valores límites para el diseño de mezcla en la investigación. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 401.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 25 de Julio de 2023. De dominio público.

Tabla 30.*Parámetros de vacíos en el agregado mineral (VAM)*

Tamaño nominal máximo del agregado en mm	Porcentaje de vacíos del agregado mineral (VAM)			
	Marshall			Superpave
	3% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾	5% ⁽¹⁾	4% ⁽¹⁾
9.50	14	15	16	15
12.50	13	14	15	14
19.00	12	13	14	13
25.00	11	12	13	12
37.50	10	11	12	11
50.00	9.5	10.5	11.5	No aplicable

⁽¹⁾ Porcentaje de vacíos con aire de la mezcla compactada.

Nota. La tabla muestra los porcentajes de admisibles para la realización de la mezcla. Obtenido de Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes. Sección 401.* (<https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>), consultado el 30 de Julio de 2023. De dominio público.

5. ENSAYOS Y RESULTADOS DE LAS BRIQUETAS SEGÚN PUNTO DE DOSIFICACIÓN

Para el diseño de mezcla asfáltica en caliente, utilizando el Método Marshall se deben ensayar las briquetas compactadas para conocer su gravedad específica, sus vacíos, su estabilidad y su fluencia.

5.1. Gravedad específica de la mezcla compactada (Bulk) para cálculo de vacíos

Tal como se explicó en el subtítulo 3.6 se procede a la determinación de la gravedad específica de la mezcla compactada (Bulk), para determinar su porcentaje de vacíos.

Como primer paso se extraen las briquetas de los moldes cilíndricos con el extractor de briquetas. Se mide el espesor de cada biqueta para posteriormente calcular su gravedad específica:

Datos:

- W_s = Peso de la muestra en estado seco expresado en gramos
- $W_{agua\ sss}$ = peso de la muestra en agua en estado saturado superficialmente seco expresado en gramos.
- $W_{aire\ sss}$ = peso de la muestra en aire en estado saturado superficialmente seco expresado en gramos.
- S_{ss} = Saturado superficialmente seco.
- G_{mb} = gravedad específica de la mezcla compactada expresada en

Gramos sobre centímetros cúbicos.

- Ftemp k = Factor de corrección de la temperatura del agua a 24 °C a
- Ftemp k = 1.000253.
- Volumen = (Waire sss - Wagua sss) expresada en centímetros cúbicos.

$$Gmb = \frac{Ws}{(Waire\ sss - Wagua\ sss) * Ftemp}$$

A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 31.

Gravedad específica de la mezcla con 0.00 % de fibras de PP

Punto 1							
Porcentaje PP	0.00 %			Volumen sin corregir	Volumen corregido	Gmb	Promedio
Briqueta	Ws	Wagua sss	Waire sss				
1	1242	732	1245	513	513.1298	2.4204	2.4214
2	1243	733	1246	513	513.1298	2.4224	

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 32.*Gravedad especifica de la mezcla con 0.50 % de fibras de PP*

Punto 2							
Porcentaje PP	0.50 %			Volumen sin corregir	Volumen corregido	Gmb	Promedio
Briqueta	Ws	Wagua sss	Waire sss				
3	1237	715	1245	530	530.1341	2.3334	2.3290
4	1237	714	1246	532	532.1346	2.3246	

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 33.*Gravedad especifica de la mezcla con 1.00 % de fibras de PP*

Punto 3							
Porcentaje PP	1.00 %			Volumen sin corregir	Volumen corregido	Gmb	Promedio
Briqueta	Ws	Wagua sss	Waire sss				
5	1242	704	1256	552	552.1397	2.2494	2.2542
6	1236	702	1249	547	547.1384	2.2590	

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 34.

Gravedad específica de la mezcla con 1.50 % de fibras de PP

Punto 4							
Porcentaje PP	1.50 %			Volumen sin corregir	Volumen corregido	Gmb	Promedio
Briqueta	Ws	Wagua sss	Waire sss				
7	1238	694	1259	565	565.1429	2.1906	2.1909
8	1234	692	1255	563	563.1424	2.1913	

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.2. Gravedad específica teórica máxima de la mezcla compactada (Rice) para cálculo de vacíos

Tal como se explicó en el subtítulo 3.5 se procede a la determinación de la gravedad específica teórica máxima (Rice), para determinar su porcentaje de vacíos.

La gravedad específica máxima Rice se obtiene a través del peso neto de la mezcla al aire dividiéndolo entre la sumatoria del peso neto de la muestra al aire más el peso del picnómetro y restándole el peso del picnómetro, agua y muestra.

Datos:

Gmmr = Gravedad específica máxima de la mezcla

pma = Peso neto de la muestra al aire

ppa = Peso del picnómetro más agua

ppma = Peso del picnómetro, agua y muestra

Ecuación a utilizar:

$$Gmmr = \frac{pma}{pma + ppa - ppma}$$

Resultados de la gravedad específica teórica máxima (Rice):

Tabla 35.

Gravedad específica teórica máxima a 0.00 % de fibras de PP

Punto 1			
Porcentaje de PP	0.00 %		Gmmr
Pma	ppa	ppma	
1286	7436	8205	2.4874

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 36.

Gravedad específica teórica máxima a 0.50 % de fibras de PP

Punto 2			
Porcentaje de PP	0.50 %		Gmmr
pma	ppa	ppma	
1285	7436	8202	2.4759

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 37.

Gravedad específica teórica máxima a 1.00 % de fibras de PP

Punto 3			
Porcentaje de PP	1.00 %		Gmmr
pma	ppa	ppma	
1284	7436	8198	2.4598

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 38.

Gravedad específica teórica máxima a 1.50 % de fibras de PP

Punto 4			
Porcentaje de PP	1.50 %		Gmmr
pma	ppa	ppma	
1286	7436	8192	2.4264

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.3. Porcentaje de vacíos en las mezclas asfálticas en caliente compactadas

El porcentaje de vacíos representa los espacios pequeños de aire, los cuales están presentes en los agregados cubiertos de bitumen de la mezcla asfáltica final compactada.

El estudio que avala este ensayo es la Norma ASTM D 3203 y su equivalente la Norma AASHTO T269, el cual detalla que las mezclas asfálticas

contengan un rango de porcentaje de vacíos determinado para permitir una compactación adicional debido a las cargas de los vehículos que pasen en la superficie del pavimento asfáltico, y proporcionar espacios donde el pavimento asfáltico pueda fluir durante esa compactación adicional. Según la norma especificada el porcentaje permitido de vacíos para capas de base y pavimentos asfálticos está entre un rango de 3 a un 5 por ciento, según el diseño de mezcla asfáltica a utilizar.

Este parámetro tiene relación de la durabilidad de un pavimento asfáltico, si este rebasa los parámetros descritos anteriormente del porcentaje de vacíos, no se garantiza el desempeño en campo de resistir efectos causados por los fenómenos de la naturaleza.

Otra característica física que está involucrado es la permeabilidad, por la razón de que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla asfáltica. El contenido de vacíos demasiado alto provoca infiltración en el cual entra el agua y el aire, para causar un deterioro continuo en él. Por otra parte, un contenido excesivo muy bajo de porcentaje de vacíos puede producir un fenómeno llamado exudación de asfalto; es una condición en donde el exceso de bitumen (cemento asfáltico), es exprimido fuera de la mezcla asfáltica hacia la superficie y causa el desprendimiento de partículas.

El porcentaje de vacíos se obtiene a través de la gravedad específica (Bulk) por cien dividiéndolo entre la gravedad específica teórica máxima (Rice).

Es por ello que es de suma importancia contar con los datos de la de la gravedad específica (Bulk), obtenida del ensayo Marshall y la gravedad específica teórica máxima (Rice).

Datos:

- % VA = Porcentaje de vacíos
- Gmmb = Gravedad específica de la mezcla (Bulk)
- Gmmr = Gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Rice)

Ecuación a utilizar:

$$\% VA = 100 - \frac{Gmmb * 100}{Gmmr}$$

Resultados de la gravedad específica teórica máxima (Rice):

Tabla 39.

Porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.00 % de fibras de PP

Punto 1		
Porcentaje PP	0.00 %	Porcentaje VA
Gmmb	Gmmr	
2.4214	2.4874	2.65

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 40.

Porcentaje de vacíos de la mezcla con 0.50 % de fibras de PP

Punto 2		
Porcentaje PP	0.50 %	Porcentaje VA
Gmmb	Gmmr	
2.3290	2.4759	5.93

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 41.

Porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.00 % de fibras de PP

Punto 3		
Porcentaje PP	1.00 %	Porcentaje VA
Gmmb	Gmmr	
2.2542	2.4598	8.36

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 42.

Porcentaje de vacíos de la mezcla con 1.50 % de fibras de PP

Punto 4		
Porcentaje PP	1.50 %	Porcentaje VA
Gmmb	Gmmr	
2.1909	2.4264	9.70

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

De los cuadros anteriores se observa el porcentaje de vacíos de cada uno de los resultados calculados los cuales servirán para el análisis gráfico de la determinación del porcentaje óptimo de polipropileno.

A continuación, se procede a calcular los vacíos de relleno asfáltico (VRA), así como los vacíos de agregado mineral (VAM).

Para determinar el VRA y VAM, se debe conocer lo siguiente:

- GSE = gravedad específica efectiva del agregado integrado
- GSB = gravedad específica neta total del agregado integrado
- Gb = gravedad específica del asfalto = 1.062
- Gbpp = gravedad específica del polipropileno = 2.71
- %Ag = porcentaje de agregado de la mezcla
- %AC = porcentaje del bitumen asfáltico
- %PP = porcentaje de polipropileno
- Gmb = densidad de la mezcla asfáltica
- DTM = densidad teórica máxima
- VA = porcentaje de vacíos de aire
- VAM = porcentaje de vacíos de agregado mineral
- VRA = porcentaje de vacíos de relleno asfáltico

Para determinar la gravedad específica neta total del agregado integrado se debe conocer los porcentajes de finos y gruesos a utilizar en la mezcla, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 43.

Porcentaje de agregados gruesos y finos según dosificación

Porcentaje	60 %	20 %	20 %	Cantidad Porcentaje
Material	1/4 a 0	3/8 a 8	1/2 a 7	
Gruesos	3.70	18.39	19.40	41.50
Finos	56.30	1.61	0.60	58.50
Total	60.00	20.00	20.00	100.00

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Sabiendo los porcentajes de agregados a utilizar se procede a determinar la gravedad especifica neta total del agregado integrado mediante la siguiente fórmula:

$$GSB = \frac{100}{\frac{\%G}{Gbg} + \frac{\%F}{Gbf}}$$

Donde:

- GSB = gravedad especifica efectiva del agregado integrado
- %G = Porcentaje de agregado fino
- %F = Porcentaje de agregado grueso
- Gbg = Gravedad especifica del agregado grueso = 2.62
- Gbf = Gravedad especifica del agregado fino = 2.59

Posteriormente, se procede a determinar gravedad específica efectiva del agregado integrado, esta se obtiene de la siguiente fórmula.

$$GSE = \frac{100 - \%AC}{\frac{100}{Gmmr} + \frac{\%AC}{Gb}}$$

Donde:

- GSE = gravedad específica efectiva del agregado integrado
- Gmmr = gravedad específica teórica máxima de la mezcla (Rice)
- %AC = porcentaje de cemento asfáltico
- Gb = gravedad específica del asfalto (Ver Anexo 1) = 1.062

Para determinar la densidad teórica máxima se usa la siguiente fórmula:

$$DTM = \frac{100}{\frac{\%AG}{GSE} + \frac{\%AC}{Gb} + \frac{\%PP}{Gb_{pp}}}$$

Posteriormente se calcula el porcentaje de vacíos de aire en la mezcla tomando como referencia la siguiente fórmula:

$$VA = \frac{(DTM - Gmb)}{DTM}$$

A continuación, se procede a calcular los resultados de VAM y VRA.

- Porcentaje de vacíos de agregado mineral (VAM)

$$VAM = 100 - \frac{(Gmb * \%AG)}{GSB}$$

- Porcentaje de vacíos de relleno asfáltico (VRA)

$$VRA = \frac{(VAM - VA)}{VAM}$$

En los siguientes recuadros se muestran los resultados de cada briqueta.

Tabla 44.

Porcentaje de vacíos en la mezcla 0.0 % de PP

Porcentaje AC-20 = 6.20 %			Porcentaje PP = 0.0 %		
Briqueta	Gmb	DTM	vacíos de aire (VA)	VAM	VRA
1	2.4204	2.48743	2.69	12.76	78.89
2	2.4224		2.61	12.69	79.39
Promedio	2.4214	2.48743	2.65	12.72	79.14

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 45.

Porcentaje de vacíos en la mezcla 0.5 % de PP

Porcentaje AC-20 = 6.20 %			Porcentaje PP = 0.5 %		
Briqueta	Gmb	DTM	vacíos de aire (VA)	VAM	VRA
3	2.3334	2.49881	5.76	16.34	64.78
4	2.3246		6.11	16.66	63.32
Promedio	2.3290	2.49881	5.93	16.50	64.05

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 46.*Porcentaje de vacíos en la mezcla 1.0 % de PP*

Porcentaje AC-20 = 6.20 %			Porcentaje PP = 1.0 %		
Briqueta	Gmb	DTM	vacíos de aire (VA)	VAM	VRA
5	2.2494	2.5103	8.56	19.79	56.76
6	2.2590		8.17	19.44	58.00
Promedio	2.2542	2.5103	8.36	19.61	57.38

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 47.*Porcentaje de vacíos en la mezcla 1.5 % de PP*

Porcentaje AC-20 = 6.20 %			Porcentaje PP = 1.5 %		
Briqueta	Gmb	DTM	vacíos de aire (VA)	VAM	VRA
7	2.1906	2.5219	9.75	22.30	56.31
8	2.1913		9.72	22.28	56.39
Promedio	2.1909	2.5219	9.73	22.29	56.35

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.4. Estabilidad y fluencia de las briquetas Marshall

Un parámetro indispensable que se debe de conocer al momento de hacer un diseño es la estabilidad y la fluencia de la mezcla compactada, a continuación, se procede a determinar la estabilidad y fluencia de cada una de las briquetas como se detalla en el subtítulo 3.7.

En las siguientes tablas se dan a conocer los resultados de las briquetas según su punto.

Tabla 48.

Estabilidad y fluencia de la mezcla con 0.00 % de PP

Punto 1	Porcentaje PP = 0.00 %		
Briquetas	1	2	Promedio
Espesor (h)	6.35	6.38	
Volumen	515	517	
Fvol.	1.00	1.00	
Ldc	330	305	
Flow (Ldf) 0.01"	11	12	12
Estabilidad (Lbs)	2478.27	2291.65	2385
Relación estabilidad / fluencia	225.30	190.97	208

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 49.

Estabilidad y fluencia de la mezcla con 0.50 % de PP

Punto 2	Porcentaje PP = 0.50 %		
Briquetas	1	2	Promedio
Espesor (h)	6.95	6.98	
Volumen	563	566	
Fvol.	0.86	0.86	
Ldc	405	415	
Flow (Ldf) 0.01"	16	15	16
Estabilidad (Lbs)	2613.62	2678.08	2646
Relación estabilidad / fluencia	163.35	178.54	171

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 50.*Estabilidad y fluencia de la mezcla con 1.00 % de PP*

Punto 3	Porcentaje PP = 1.00 %		
Briquetas	1	2	Promedio
Espesor (h)	7.10	7.00	
Volumen	576	568	
Fvol.	0.83	0.86	
Ldc	421	430	
Flow (Ldf) 0.01"	18	17	18
Estabilidad (Lbs)	2620.76	2774.62	2698
Relación estabilidad / fluencia	145.60	163.21	154

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Tabla 51.*Estabilidad y fluencia de la mezcla con 1.50 % de PP*

Punto 4	Porcentaje PP = 1.50 %		
Briquetas	1	2	Promedio
Espesor (h)	7.28	7.30	
Volumen	590	592	
Fvol.	0.81	0.81	
Ldc	470	450	
Flow (Ldf) 0.01"	19	20	20
Estabilidad (Lbs)	2855.57	2734.50	2795
Relación estabilidad / fluencia	150.29	136.72	144

Nota. La tabla muestra los resultados calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.5. Resultados

Con estos datos obtenidos se procede a determinar el porcentaje óptimo de polipropileno para la mezcla de agregados por medio del análisis gráfico de cada uno de estos resultados.

Enseguida se da a conocer el resumen de los promedios de cada resultado obtenido en cada parámetro calculado.

Tabla 52.

Resumen de resultados

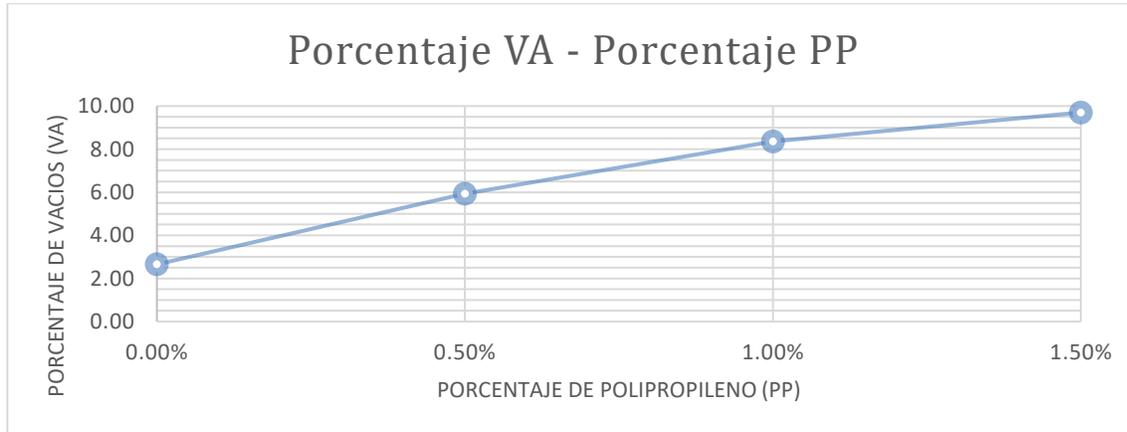
Punto	Porcentaje PP	Porcentaje AC	Gmb	Porcentaje VA	VAM	VRA	Estabilidad	Fluencia	REF
1	0.00 %	6.20 %	2.4214	2.65	12.72	79.14	2385	12	208
2	0.50 %	6.20 %	2.3290	5.93	16.50	64.05	2646	16	171
3	1.00 %	6.20 %	2.2542	8.36	19.61	57.38	2698	18	154
4	1.50 %	6.20 %	2.1909	9.70	22.29	56.47	2795	20	144

Nota. La tabla muestra los resultados finales de forma resumida de los calculados para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Seguidamente se muestra el resumen expresado en figuras, de los resultados de cada valor obtenido de cada parámetro calculado, en el cual se hacen relaciones de todos los valores obtenidos con respecto al porcentaje de polipropileno adherido a la mezcla asfáltica en caliente la cual fue proporcional para cada punto según su dosificación.

Figura 48.

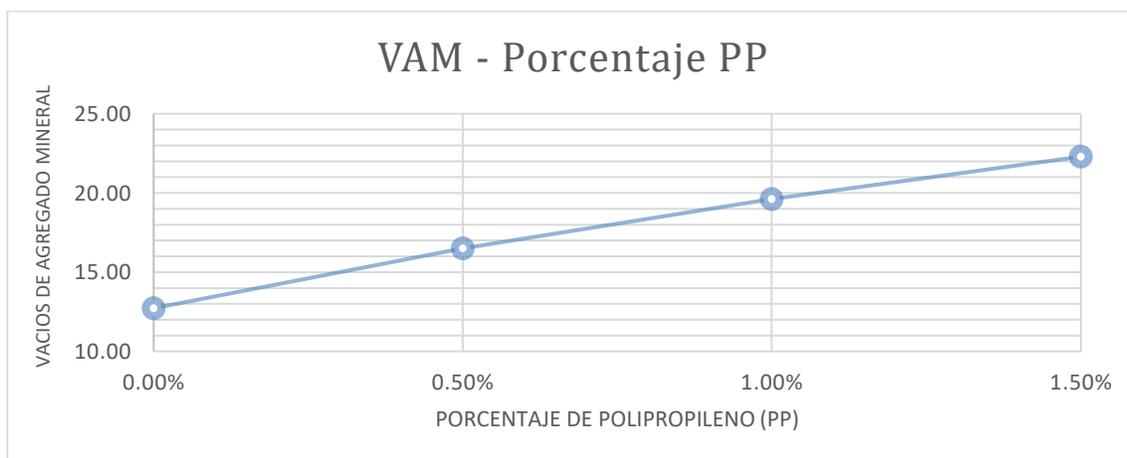
Vacíos de aire versus porcentaje de polipropileno



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 49.

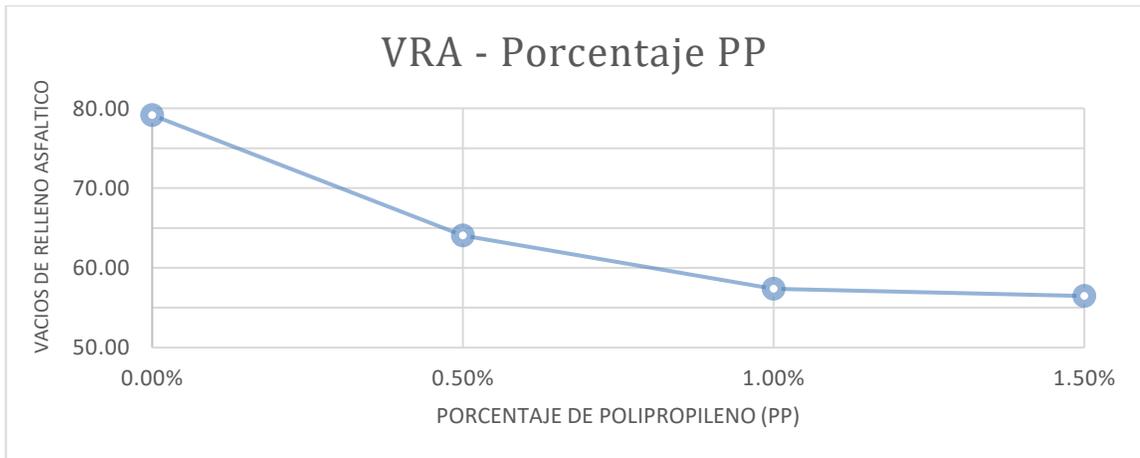
Vacíos en agregado mineral versus porcentaje de polipropileno



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 50.

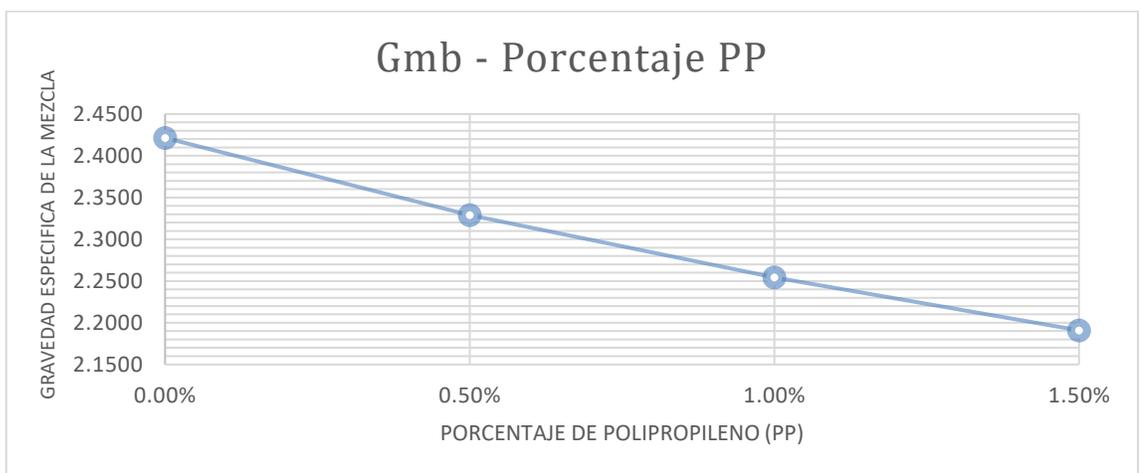
Vacíos de relleno asfáltico versus porcentaje de PP



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 51.

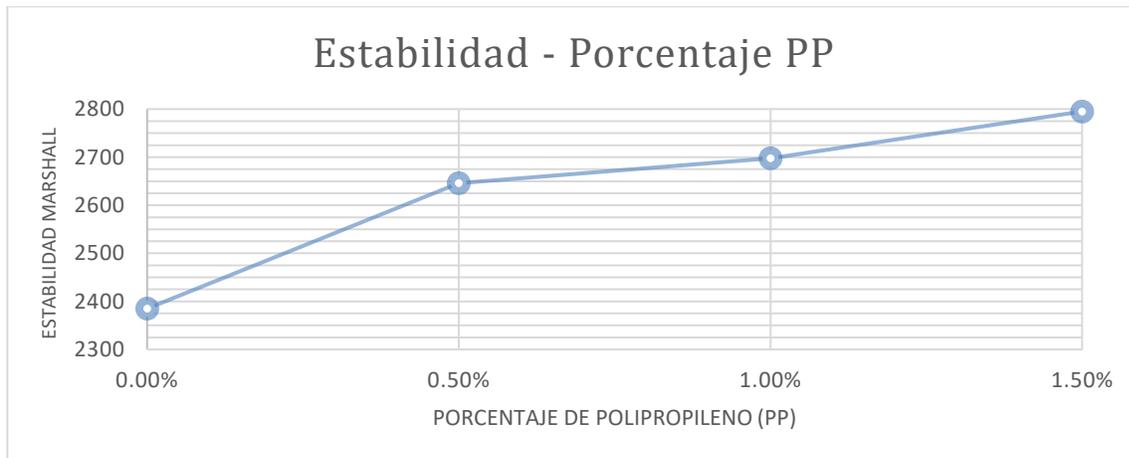
Gravedad específica de la mezcla versus porcentaje de PP



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 52.

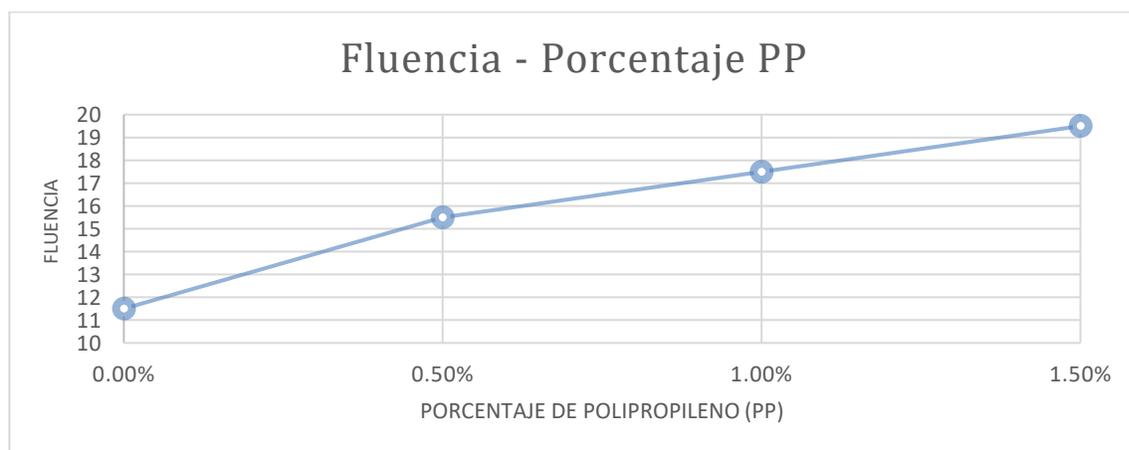
Estabilidad versus porcentaje de polipropileno



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 53.

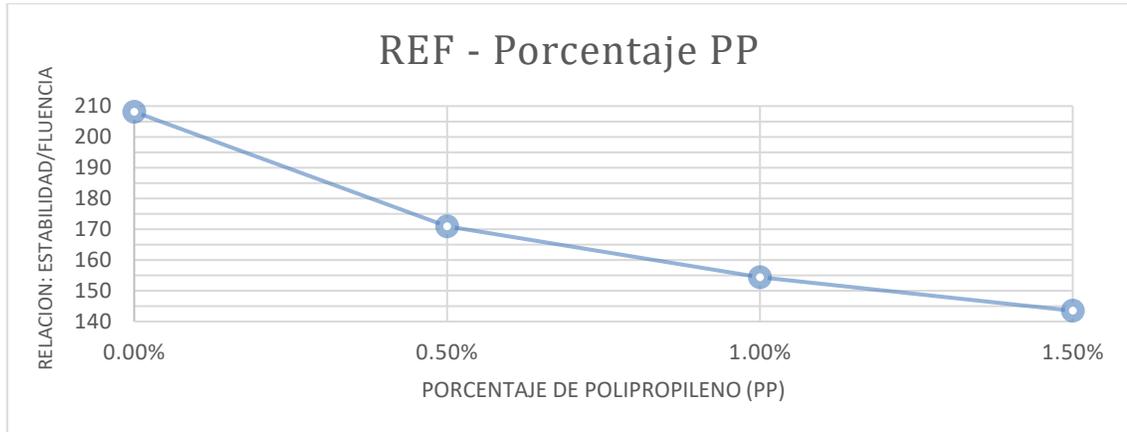
Fluencia versus porcentaje de polipropileno



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

Figura 54.

Relación: estabilidad/fluencia versus porcentaje de PP



Nota. El gráfico muestra la relación establecida para cada muestra propuesta. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.6. Análisis de los resultados

A través de las gráficas anteriores se logra determinar los resultados de cada parámetro en función de los puntos de porcentaje de fibras de polipropileno en cada briqueta ensayada, en las gráficas se logra observar de forma gráfica la tendencia de los resultados, estas aumentan o disminuyen en función del porcentaje de fibras de polipropileno, ya que a medida se vaya aumentando el porcentaje de fibras de polipropileno en la mezcla asfáltica, estas irán variando su trazabilidad en las gráficas.

- Vacíos VA

En la gráfica se logra verificar la tendencia de la gráfica, la cual indica que, a mayor porcentaje de polipropileno, mayor será el porcentaje de vacíos, es por ello que la tendencia de la gráfica es ascendente.

- Gravedad específica de la mezcla compactada Gmb

Se logra ver que la tendencia de la gráfica es descendente, ya que, a mayor porcentaje de polipropileno, la gravedad específica disminuye sobre la mezcla asfáltica compactada.

- Vacíos de agregado mineral VAM

Los vacíos de agregado mineral son directamente proporcionales a la cantidad de polipropileno en la mezcla, a mayor cantidad de polipropileno, mayor será el vacío de agregado mineral.

- Vacíos de relleno asfáltico VRA

Se puede observar la tendencia en la gráfica que a medida en que aumenta el porcentaje de polipropileno, los vacíos de relleno asfáltico disminuyen, esto se debe en gran manera a la gravedad específica del polipropileno.

- Estabilidad

La relación de resistencia máxima de carga de la mezcla depende del contenido de polipropileno, ya que, si la mezcla contiene bajo contenido de polipropileno, la mezcla presenta una baja estabilidad, como también si la mezcla contiene un alto porcentaje de polipropileno, esta se vuelve muy rígida.

- Fluencia

El valor de la fluencia es un valor que tiende a ser lineal en función al porcentaje de polipropileno en la mezcla, y está relacionada directamente con ésta, ya que, a mayor cantidad de polipropileno en la mezcla, mayor fluencia presenta la mezcla.

- Relación: estabilidad / fluencia

La gráfica presenta una tendencia descendente ya que a mayor estabilidad presenta la mezcla asfáltica mayor es la fluencia presentada en la muestra, esto hace que el comportamiento en la relación estabilidad / fluencia descienda a mayor contenido de polipropileno.

CONCLUSIONES

1. Mediante el ensayo de Marshall se logró determinar la resistencia de una mezcla asfáltica tradicional y una mezcla asfáltica con la implementación de fibras de polipropileno a diferentes porcentajes, como resultados se logra determinar que a medida en que se aumente la cantidad de polipropileno (PP) en la mezcla asfáltica, mayor será la resistencia, eso debido a que las fibras aumentan la adherencia en las partículas de los agregados y el cemento asfáltico, cabe la pena resaltar que no necesariamente el que la mezcla sea resistente indique que sea bueno, ya que presentan mayor fluencia a razón en que aumenta el contenido de polipropileno (PP), haciendo que sea demasiado rígidas.
2. Se determinó que a razón en que aumenta la cantidad de polipropileno (PP) en la mezcla asfáltica, también aumenta el porcentaje de vacíos, estas se logran ver en la gráfica “porcentaje de vacíos versus porcentaje de polipropileno”, según las Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala describe que como parámetro máximos es un 5 %, si el porcentaje en una mezcla es mayor a este, no se garantiza el desempeño en campo de resistir efectos causados por los fenómenos de la naturaleza. El contenido de vacíos demasiado alto provoca infiltración en el cual entra el agua y el aire, para causar un deterioro continuo en él, se podría decir que el porcentaje óptimo de (PP) oscila en un rango menor al 0.5 % en la mezcla, esto con el fin de poder estar en el rango permitido de porcentaje de vacíos según el “Libro Azul”.

3. El comportamiento de la mezcla asfáltica mejorada, presenta que en la mezcla asfáltica tiene una densidad menor a razón en que se aumenta el porcentaje de polipropileno, esto favorece al rendimiento de la mezcla, esto se debe a que las fibras de polipropileno representan mucho volumen y su densidad es baja, lo cual favorece el rendimiento de la colocación en tramos de carretera.
4. Las características físicas y propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas evaluadas son muy distintas, debido a que la mezcla asfáltica con polipropileno (PP) tiene deficiencias notables con el porcentaje de vacíos, comparándolos con un diseño de mezcla propuesto normal que cumple los parámetros mínimos, la carga, deformación y porcentaje de vacíos, estos son fundamentales en la realización de una mezcla asfáltica normal; por otra parte, al realizar un diseño de mezcla asfáltica que tenga los parámetros sugeridos en el rango granulométrico en la sección 401 del "Libro Azul", no significa que cumplirá lo sugerido y que esté en condiciones óptimas. Por esta razón se hicieron pruebas con un diseño granulométrico, el cual optimiza la calidad de las mezclas asfálticas.
5. Cualquier cambio en la dosificación de material utilizado en la mezcla puede alterar los resultados de diseño, por lo que se debe realizar un diseño nuevo, es por ello que el equipo utilizado para la dosificación debe estar perfectamente calibrado.
6. A medida en que aumenta la cantidad de polipropileno (PP), en la mezcla asfáltica, también aumenta el contenido de relleno mineral (VAM), esto provoca que a valores muy altos la mezcla se comporte de manera muy viscosa y difícil de manejar haciendo que sea poca durable.

RECOMENDACIONES

1. Contar con los equipos adecuados y calibrados, para la realización de los ensayos con el fin de poder obtener los resultados más precisos.
2. Utilizar el equipo de protección personal para la manipulación de la mezcla asfáltica en caliente, ya que se trabajada a altas temperaturas.
3. Tomar en cuenta cada parámetro en cada ensayo, para poder comparar los resultados de cada ensayo efectuado, con el fin de poder cumplir con las especificaciones en particular.
4. Preparar la mezcla fraccionando en cuatro partes, esto con el fin de poder distribuir las partículas de una forma homogénea, de este modo se evita la segregación la cual puede alterar la graduación granulométrica de la mezcla.
5. Conocer la temperatura de en la cual se compacta la mezcla, ya que la temperatura es el indicador que determina si la mezcla compactada es muy abierta o cerrada según la cantidad de vacíos en la mezcla.
6. Librar los contaminantes de las fibras de polipropileno para evitar alterar los resultados a la hora de ensayar las briquetas, cabe resaltar que el tamaño de las fibras debe ser los más homogéneas posibles para evitar alteraciones en los resultados.

REFERENCIAS

- Asphalt Institute (1994). *Manual MS-22 Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente*. <https://www.asphaltinstitute.org/>
- Castañeda, C., Escobar, G., y López, L. (2011). *Aplicación del método Marshall y granulometría superpave en el diseño de mezcla asfáltica templada con emulsión asfáltica*. [Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador]. Archivo digital. https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2079/1/Aplicacion_del_metodo_marshall_y_granulometria_superpave_en_el_dise%C3%B1o_demezcla_asfaltica_templada_con_emulsion_asfaltica.pdf
- Cox, P. (2015). *Manual de laboratorio para estudiantes para el desarrollo de ensayos en concreto asfáltico en caliente*. [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio institucional.
- Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. <https://www.caminos.gob.gt/files/Desc-LibroAzul-Sept2001.pdf>
- Velásquez, T. (2007). *Modificación de mezclas asfálticas con fibras de polipropileno, Bogotá, Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad de Los Andes]. Archivo digital. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/52b63122-c83c-44fb-9763-cddc967a6a66/content>

ANEXOS

Anexo 1.

Resultados de análisis de laboratorio para AC-20



PERENCO
PERENCO GUATEMALA LIMITED

ASFALTO AC-20
Especificación para clasificación por grado de viscosidad | ASTM D-3381

FECHA:	28 de mayo de 2023	AC-20
HORA:	18:20	
TANQUE:	2	
LOTE:	160-2023	

RESULTADO DE ANÁLISIS DE LABORATORIO

ANÁLISIS	UNIDAD	RESULTADO	RANGOS	MÉTODO ASTM
Gravedad específica a 60°F	--	1.062	N.e.	D-70
Densidad a 60°F	Lb/gal	8.730	N.e.	D-70
Gravedad específica a 77°F	--	1.058	N.e.	
Penetración a 77°F, 100g, 5 seg.	0.1mm	82	≥60	D-5
Viscosidad absoluta, 140°F	Poises	2,273	2,000 ± 400	D-2171
Viscosidad cinemática, 275°F	cStokes	466	≥300	D-2170
Flash point, COC	°F	515	≥450	D-92
Punto de ablandamiento	°F	117	N.e.	D-36
Solubilidad en TCE	%	99.9	≥99.0	D-2042
Ensayos al residuo TFOT				D-1754
Viscosidad, 140°F	Poises	5,896	<10,000	D-2171
Ductilidad, 77°F, 5 cm/minuto	cm	>100	>50	D-113
VTS	--	3.44	N.e.	

N.e. = No especifica

30/05/2023
Beto H
116052058



Dr. Fredy D. Barrios O.
Ingeniero de Proceso y Control de Calidad
Representante de Perenco Guatemala Limited

Laboratorio Refinería La Libertad
La Libertad, Petén, Guatemala
(502) 2384-6100 ext. 111
e-mail: laboratorio@libertad@gt.perenco.com

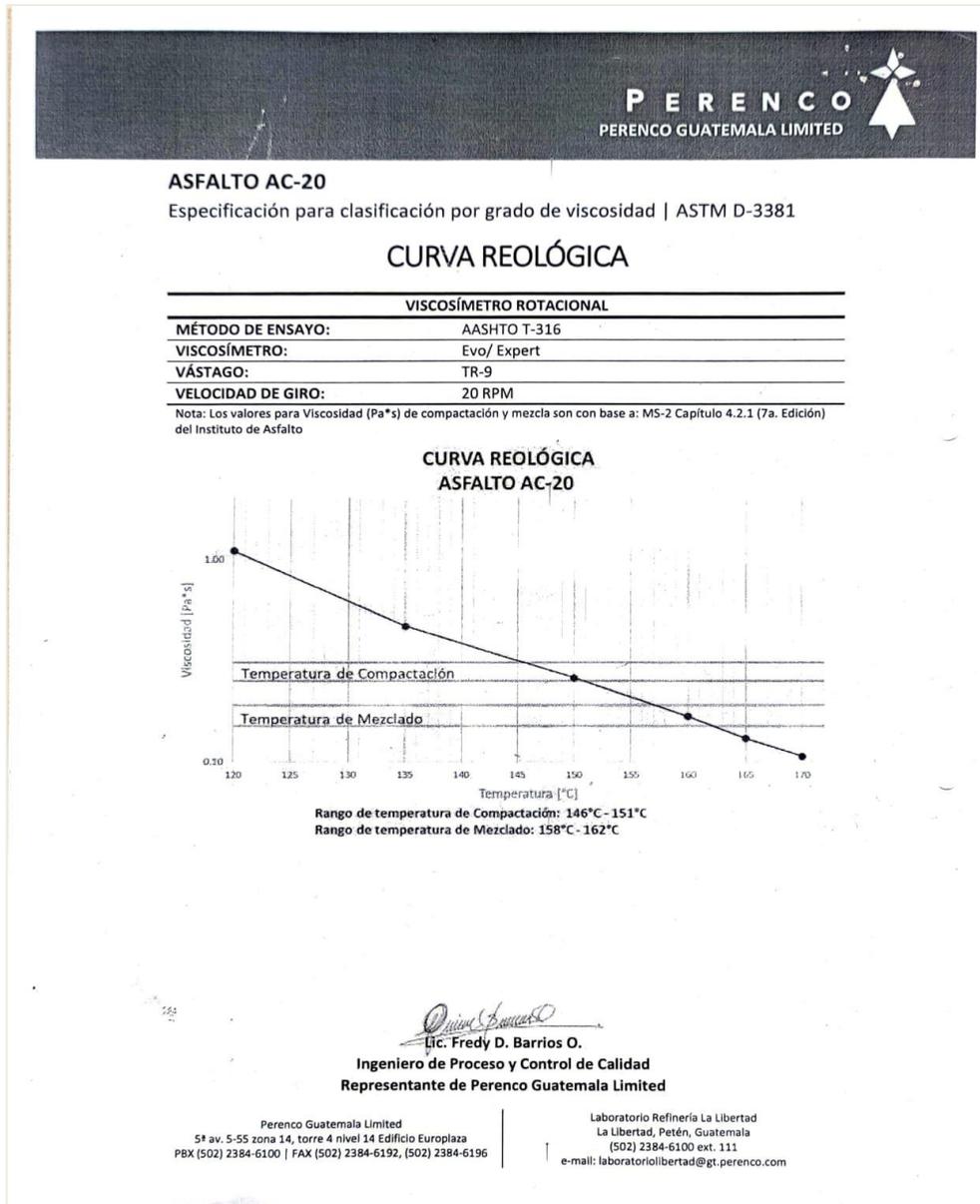
Perenco Guatemala Limited
54 av. 5-55 zona 14, torre 4 nivel 14 Edificio Europlaza
PBX (502) 2384-6100 | FAX (502) 2384-6192, (502) 2384-6196

Laboratorio Refinería La Libertad
La Libertad, Petén, Guatemala
(502) 2384-6100 ext. 111
e-mail: laboratorio@libertad@gt.perenco.com

Nota. Caracterización del cemento asfáltico convencional AC-20. Obtenido de Perenco Guatemala Limited (2023). *Especificación para clasificación por grado de viscosidad / ASTM D – 3381.* PERENCO.

Anexo 2.

Gráfico de análisis de viscosidad versus temperatura de AC-20



Nota. Gráfico de la caracterización del cemento asfáltico convencional AC-20. Obtenido de Perenco Guatemala Limited (2023). *Especificación para clasificación por grado de viscosidad / ASTM D – 3381.* PERENCO.