



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

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON
RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO
TRADICIONAL**

Carlos Francisco Gómez Jerónimo

Asesorado por el Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos

Guatemala, marzo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON
RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO
TRADICIONAL**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS FRANCISCO GÓMEZ JERÓNIMO
ASESORADO POR EL ING. DARÍO FRANCISCO LUCAS MAZARIEGOS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MARZO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
EXAMINADOR	Ing. William Ricardo Yon Chavarría
EXAMINADOR	Ing. Milton Lenin Hernández González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 09 de mayo de 2017.



Carlos Francisco Gómez Jerónimo

Guatemala, 10 de enero de 2019

Ingeniero civil
José Gabriel Ordoñez Morales
Escuela de Ingeniería Civil
Área de Materiales y Construcciones civiles
Facultad de Ingeniería, USAC

Ingeniero Ordoñez:

Por medio de la presente me dirijo a usted, para hacer de su conocimiento que como Asesor del estudiante universitario, Carlos Francisco Gómez Jerónimo, con numero de carné: 201314888, he tenido a la vista el trabajo de graduación titulado: "PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL" el cual encuentro satisfecho.

En tal virtud, LO DOY POR APROBADO, solicitándole darle el trámite respectivo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.



Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos
Colegiado 10,266

~~Ing. Dario Francisco Lucas Mazariegos~~

Número Colegiado: 10266



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Guatemala,
22 de febrero de 2019

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos


Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Carlos Francisco Gómez Jerónimo quien contó con la asesoría del Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos.

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 ENSEÑADA A TODOS.

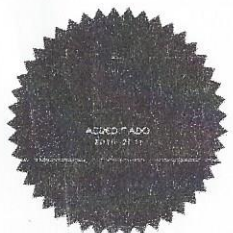

Ing. Civil José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/mrrm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

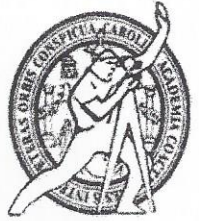




USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos y Coordinador del Departamento de Materiales y Construcciones Civiles Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Carlos Francisco Gómez Jerónimo **PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2019

/mmm.

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua


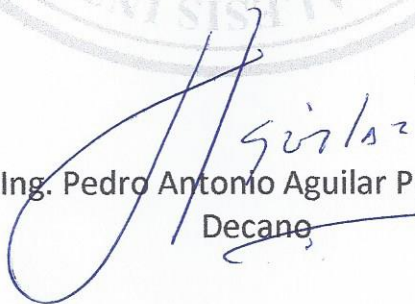




El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **PROPIEDADES MECÁNICAS DE UN CONCRETO ASFÁLTICO, MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO TEMPLADO Y CAL, COMPARADO CON UNA MEZCLA DE DISEÑO TRADICIONAL**, presentado por el estudiante universitario: **Carlos Francisco Gómez Jerónimo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, marzo de 2019

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios todopoderoso	Por tener amor incondicional y darme muchas bendiciones, las cuales han hecho milagros en momentos muy especiales. Quien nunca falla y quien me ha permitido alcanzar toda meta que me he propuesto en la vida.
Mis padres	David Gómez Vásquez, María Magdalena Jerónimo López, por su amor, oración, apoyo incondicional, comprensión y por guiarme en el camino de rectitud para lograr esta meta, sabiendo que estamos en las manos de Dios.
Mis hermanos	Rosa, Felipe, Ángel, Ana, Paola, Denis Gómez, por su apoyo y motivación, el cual me ha sido de bendición.
Mi familia	Por el apoyo que han dado en todo momento.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Tricentenaria casa de estudios, y principalmente a la Facultad de Ingeniería, por formarme como exitoso profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios todopoderoso

Por la bendición de permitirme finalizar una meta muy especial, teniendo fe y fortaleza en él para seguir adelante y dar todo lo mejor de mí.

Mis padres

David Gómez Vásquez, María Magdalena Jerónimo López, por ser mi modelo a seguir haciendo todo con rectitud y por todo el apoyo que me otorgaron, ya que no hubiese sido posible este gran logro sin ellos.

Mis hermanos

Rosa, Felipe, Ángel, Ana, Evelyn, Denis Gómez, por cada momento que hemos compartido y el apoyo que siempre ha existido de parte de ustedes, bendiciones.

Mi familia

Por el apoyo que ha puesto a mi diario vivir.

Iglesia

Por sus oraciones y apoyo que ha dado a mí y a mi familia, en todo momento.

Universidad de San Carlos de Guatemala

Tricentenaria casa de estudios, y principalmente a la Facultad de Ingeniería, por formarme como exitoso profesional.

A mi asesor

Ing. Darío Francisco Lucas Mazariegos, quien de manera apropiada me apoyó y me guió en cada paso de la investigación.

José Juan Istupe

Por su amistad y dedicación en todo momento, por compartir todos sus conocimientos y por su ayuda incondicional en cada paso de la investigación y los diferentes ensayos de laboratorio.

Idalma Isabel García

Por su apoyo en todo momento, por compartir muchas experiencias, así como por su ayuda y motivación en la carrera.

Mis amigos

Klever López, Leonel Gómez, Ricardo Marroquín, Allan Colindres, Pau Gaitán, Luis Guzmán, Byron Cajero, por su amistad y por vivir y compartir muchas experiencias en la carrera universitaria.

Laboratorio de asfaltos

José Istupe, Herbert López, Pablo Tello, Paola Urquizu, Brian Ortiz, por su apoyo y por vivir y compartir experiencias las cuales en buena medida se han realizado en este trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Estudios previos de mezcla asfáltica en caliente.....	1
1.1.1. Criterios para el diseño de mezcla asfáltica en caliente	1
1.1.1.1. Autor: José Luis León Fajardo.....	2
1.1.1.2. Conclusiones	2
1.1.1.3. Recomendaciones.....	3
1.1.2. Producción de mezclas asfálticas en caliente.....	4
1.1.2.1. Autor: Erick Rolando Anleu Hernández	4
1.1.2.2. Conclusiones	5
1.1.2.3. Recomendaciones.....	5
1.1.3. Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente	7
1.1.3.1. Autor: Víctor Alejandro Rosales Castañeda	7
1.1.3.2. Conclusiones	8

1.1.3.3.	Recomendaciones.....	9
1.1.4.	Utilización de desecho de vidrio templado como árido grueso para la elaboración de concreto	11
1.1.4.1.	Autor: Carlos Eduardo Suque Soc	11
1.1.4.2.	Conclusiones.....	12
1.1.4.3.	Recomendaciones.....	13
2.	VIDRIO TEMPLADO Y CAL HIDRATADA.....	15
2.1.	Historia del vidrio.....	15
2.2.	Composición del vidrio templado	18
2.3.	Proceso de fabricación del vidrio templado.....	19
2.4.	Características del vidrio	22
2.4.1.1.	Características físicas	22
2.4.1.2.	Color.....	22
2.4.1.3.	Textura	23
2.4.1.4.	Peso	23
2.4.1.5.	Maleabilidad	24
2.4.2.	Propiedades mecánicas	24
2.4.2.1.	Flexión.....	24
2.4.2.2.	Impacto.....	24
2.4.2.3.	Dureza.....	25
2.4.3.	Características químicas	25
2.4.3.1.	Resistencia al agua	25
2.4.3.2.	Resistencia a los ácidos	26
2.4.3.3.	Resistencia a los agentes atmosféricos	26
2.5.	Proceso de transformación del vidrio templado	27
2.6.	Tipos de vidrio	28
2.7.	Problemas ambientales derivados de su mala disposición	30

2.8.	Formas de reciclaje actuales	30
2.8.1.	Reciclaje tradicional.....	30
2.8.2.	Otras formas de reciclado de vidrio templado.....	31
2.9.	Manejo actual de residuos a nivel nacional	32
2.9.1.	Estimados de generación de vidrio	33
2.9.2.	Volumen estimado de vidrio en los residuos domiciliarios.....	33
2.10.	Tratamiento, infraestructura y capacidad actual en el país.....	34
2.11.	Ciclo de vida del residuo a nivel nacional (diagrama).....	35
2.11.1.	Cal hidratada	38
2.11.1.1.	Definición	38
2.11.1.2.	Uso	38
2.11.1.3.	Presentación.....	39
2.11.1.4.	Beneficios	39
2.11.1.5.	Pureza	39
3.	DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	41
3.1.	Características de una mezcla asfáltica	41
3.1.1.	Contenido de bitumen	42
3.1.2.	Resistencia a la deformación.....	44
3.1.3.	Resistencia a la fatiga.....	45
3.1.4.	Resistencia al agrietamiento por temperatura	46
3.1.5.	Resistencia al deslizamiento.....	46
3.1.6.	Resistencia a la humedad	47
3.1.7.	Durabilidad.....	48
3.1.8.	Trabajabilidad	49
3.2.	Ensayos a realizar	50
3.2.1.	Metodología de Marshall	50
3.2.2.	Gravedad específica bruta (<i>Bulk</i>)	52

3.2.3.	Gravedad específica teórica máxima	52
3.2.4.	Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas	52
3.2.5.	Porcentaje de vacíos	53
3.2.6.	Granulometría del vidrio templado	54
3.2.7.	Gravedad específica del vidrio templado	55
3.3.	Desempeño mecánico de la capa de rodadura para concreto asfáltico	55
3.3.1.	Influencia del clima en el desempeño de la carpeta de rodadura	56
3.3.2.	Influencia en la carga vehicular en el desempeño de la carpeta de rodadura	56
3.3.3.	Influencia de la edad en el comportamiento de la carpeta de rodadura	57
3.3.4.	Influencia de la topografía en el desempeño de la carpeta de rodadura	58
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	59
4.1.	Obtención del vidrio templado	59
4.2.	Caracterización de los agregados	60
4.2.1.	Agregado (vidrio templado) y árido	61
4.2.1.1.	Granulometría	62
4.2.1.1.1.	Agregado fino	62
4.2.1.1.2.	Agregado grueso	63
4.3.	Procedimiento del Método Marshall	63
4.3.1.	Descripción de la metodología del diseño de mezcla	64
4.3.1.1.	Metodología	64
4.3.1.2.	Procedimiento	66

4.3.2.	Descripción de la metodología para elaboración de probetas de mezclas asfálticas.....	69
4.3.2.1.	Metodología.....	69
4.3.2.2.	Procedimiento.....	73
4.3.3.	Descripción de la metodología para obtener gravedad específica de <i>Bulk</i>	75
4.3.3.1.	Metodología.....	75
4.3.3.2.	Procedimiento.....	77
4.3.4.	Descripción de la metodología para obtener gravedad específica teórica máxima	78
4.3.4.1.	Metodología.....	78
4.3.5.	Procedimiento.....	80
4.3.6.	Descripción de la metodología de porcentaje de vacíos	82
4.3.6.1.	Metodología.....	82
4.3.6.2.	Procedimiento.....	83
4.3.7.	Descripción de la metodología de prueba de estabilidad y flujo Marshall.....	83
4.3.7.1.	Metodología.....	84
4.3.7.2.	Procedimiento.....	86
4.4.	Datos obtenidos y cálculos a realizar	87
4.5.	Análisis y comparación de resultados	94
4.5.1.	Resumen de resultados.....	94
CONCLUSIONES		101
RECOMENDACIONES.....		103
BIBLIOGRAFÍA.....		105
APÉNDICES		109
ANEXOS		113

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Descripción del proceso de fabricación del vidrio templado	21
2.	Diagrama de vida del vidrio templado	37
3.	Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica.....	42
4.	Planchas de vidrio templado	59
5.	Trituración de planchas de vidrio templado.....	61
6.	Vidrio templado obtenido de la trituración	62
7.	Tara con muestra de agregados gruesos y finos	63
8.	Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica tradicional	69
9.	Equipo utilizado para calentar agregados	71
10.	Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica.....	71
11.	Pedestal de compactación y termómetro para medición de temperatura.....	72
12.	Equipo de medición de material para mezcla asfáltica.....	72
13.	Balanza provista de dispositivo de suspensión	76
14.	Pileta de agua para suspensión de probeta	77
15.	Bomba de vacío, picnómetro para vacío y dispositivo de agitación. Dispositivo para atrapar el vapor de agua y manómetro de presión residual.....	80
16.	Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija.....	85
17.	Recipiente con control termostático	86
18.	Gráfico de gravedad específica <i>Bulk</i>	95
19.	Gráfico de gravedad específica teórica máxima	96
20.	Gráfico de gravedad porcentaje de vacíos y densidad	97
21.	Gráfico de estabilidad Marshall	98

22.	Gráfico de flujo Marshall	99
-----	---------------------------------	----

TABLAS

I.	Composición del vidrio templado	18
II.	Colorantes del vidrio templado	23
III.	Composición de residuos sólidos domiciliarios (vidrio).....	33
IV.	Generación de vidrio a nivel domiciliario	34
V.	Total de residuos recuperados (vidrio).....	35
VI.	Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento.....	44
VII.	Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga	45
VIII.	Causas y efectos a la poca resistencia al deslizamiento	47
IX.	Causas y efectos de mezcla demasiado permeable.....	47
X.	Causa y efecto de la poca durabilidad	49
XI.	Causas y efectos de la mala trabajabilidad.....	50
XII.	Requisitos para mezcla de concreto asfáltico	65
XIII.	Porcentaje mínimo de VAM	66
XIV.	Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico (ASTM D 3515).....	67
XV.	Diseño propuesto de mezcla asfáltica	68
XVI.	Datos y resultados de la gravedad específica <i>Bulk</i> , mezcla tradicional	88
XVII.	Datos y resultados de la gravedad específica <i>Bulk</i> , mezcla modificada	89
XVIII.	Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla tradicional	90
XIX.	Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla modificada	91

XX.	Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla tradicional	92
XXI.	Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla modificada	92
XXII.	Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla tradicional.....	93
XXIII.	Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla modificada.....	94
XXIV.	Cuadro comparativo de gravedad específica <i>Bulk</i>	95
XXV.	Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima	96
XXVI.	Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos y densidad.....	97
XXVII.	Cuadro comparativo de estabilidad Marshall	98
XXVIII.	Cuadro comparativo de flujo Marshall	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Bitumen
cSt	<i>centiStokes</i>
Delft	Deformación igual a 0,0001”
ESAL	<i>Equivalent simple axial load</i> (factor de equivalencia de carga)
G	Gramos
G_{mb}	Gravedad específica <i>bulk</i> de la mezcla asfáltica
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los agregados
G_{mm}	Gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica
kPa	Kilopascal
lbf	Libras-fuerza
A	Masa del espécimen de mezcla asfáltica
B	Masa del espécimen de mezcla asfáltica saturado y con superficie seca
C	Masa del espécimen de mezcla asfáltica sumergido en agua
E	Masa del picnómetro con la muestra y lleno de agua
D	Masa del picnómetro lleno de agua
mm	Milímetros
mm Hg	Milímetros de mercurio
Pa-s	Pascales-segundo

W_s	Peso material seco
W_{ms}	Peso matraz con agua
W_{ms}	Peso matraz con material seco
W_{msw}	Peso matraz con suelo y agua
W_m	Peso matraz limpio y seco
% H	Porcentaje de humedad
VA	Porcentaje de vacíos
VAM	Porcentaje de vacíos en el agregado mineral
VFA	Porcentaje de vacíos llenado con asfalto
<i>psi</i>	<i>Pounds-force per square inch</i> (libras-fuerza por pulgada cuadrada)

GLOSARIO

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 pétreo	Agregado proveniente de la trituración de roca, de piedra o de un peñasco.
Anillo dinamométrico	instrumento que se utiliza en muchos componentes industriales y aparatos de medida para determinar niveles de cargas estáticas y dinámicas.
Asfalto espumado	Se forma cuando el asfalto caliente, añadiendo una pequeña cantidad de agua, se evapora y produce una expansión explosiva del asfalto en el vapor de agua saturado.
Bitumen	Aglomerante proveniente de la fracción pesada de la destilación del petróleo crudo.
Bomba de vacío	Máquina utilizada para extraer, impulsar o elevar moléculas de gas de un volumen sólido.
Contenido de asfalto	Cantidad de asfalto que se adiciona a la mezcla de agregados pétreos para obtener las cualidades deseadas en el diseño de mezcla.

Deformímetro	Instrumento que mide desplazamientos lineales.
Densidad	Relación que existe entre la masa y el volumen que ocupa una sustancia.
Estabilidad	Capacidad de la mezcla asfáltica para resistir desplazamiento y deformación bajo la aplicación de carga.
Filler	(Material pasa tamiz No.200). Es un material que en mezclas asfálticas en caliente, aglomera los distintos elementos del árido, proporcionando la cohesión necesaria para aumentar la rigidez del material.
Fluencia	Deformación en centésimas de pulgada de la briqueta, 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.
INV	Instituto Nacional de Vías de Colombia.
Ligante	Material cuya función es de pegar o unir partículas de otros materiales.

Manómetro	Instrumento utilizado para medir la presión de un fluido, especialmente de los gases.
Mezcladora de Tambor	Consiste en una carcasa cilíndrica que se puede rotar a lo largo de su eje para producir flujo cruzado del material.
Pavimento flexible	Constituido con un material bituminoso como aglomerante y agregados pétreos.
Picnómetro	Instrumento de medición utilizado para conocer la densidad o peso específico de un fluido líquido o sólido.
Probeta	Pieza sometida a ensayos para estudio del material del que está hecha.
Vacíos de aire	Espacios pequeños de aire o bolsas de aire, que están presentes entre las partículas de la mezcla asfáltica.
Viscosidad	Medida de la resistencia a la deformación de un fluido, producida por fuerzas cortantes.

RESUMEN

En los últimos años, el desarrollo de técnicas basadas en la reutilización de residuos, ha permitido concebir a las carreteras como una posible solución a esta problemática. Concretamente, el empleo de residuos como sustitutos de los áridos utilizados en su construcción supone no solo la disminución de estos en vertederos, sino también la reducción del impacto generado por la explotación de canteras y el transporte de áridos.

En este contexto, surge la investigación desarrollada en la presente tesis, cuyo objetivo es analizar la reutilización de residuos de vidrio templado como sustituto de los áridos naturales, en la fabricación de mezclas asfálticas para su empleo en la construcción de carreteras.

En el estudio de investigación se evaluaron las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica convencional y del diseño de mezcla asfáltica adicionando vidrio templado como agregado, además de los agregados utilizados para los diseños de mezcla asfáltica, de acuerdo a los procedimientos y especificaciones aplicables indicados por ASSHTO y ASTM.

OBJETIVOS

General

Comparar las propiedades mecánicas de un concreto asfáltico modificado con residuos de vidrio templado y cal, con una mezcla de diseño tradicional según Norma ASTM D-1559.

Específicos

1. Estimar, según informes de instituciones del Estado y empresas privadas, el volumen del vidrio templado que se vierte o se desperdicia en Guatemala.
2. Dosificar una mezcla asfáltica de diseño tradicional, según Norma ASTM D-1559 y utilizarla como mezcla patrón.
3. Determinar las características físicas y propiedades mecánicas de la mezcla patrón.
4. Determinar el volumen ideal de vidrio templado y cal a integrar en la mezcla asfáltica a proponer.
5. Determinar las características físicas y propiedades mecánicas de la modificada con vidrio templado y cal.
6. Efectuar la comparación de los resultados de la mezcla patrón y la mezcla modificada con vidrio templado y cal.

INTRODUCCIÓN

El trabajo de investigación consiste en darle un uso útil a la gran cantidad de desechos de vidrio templado generados en nuestro país, aprovechándolos como agregado a la mezcla asfáltica en caliente, que es utilizada en pavimentos flexibles, buscando mejorar las propiedades de la mezcla asfáltica en aspectos físicos y mecánicos.

Para el diseño se seguirán los procedimientos del Método Marshall dentro de los parámetros ya establecidos según las Normas AASHTO T 245 y ASTM 1559, cumpliendo con la división 400 pavimentos asfálticos, sección 401 Pavimentos de Concreto Asfáltico en Caliente, de las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes, de la Dirección General de Caminos.

Luego se analizará detenidamente la forma y método que permita la introducción del material vidrio templado dentro de la granulometría del concreto asfáltico; es decir, dosificando el tamaño de partículas de vidrio templado y adicionando cal para aumentar la adherencia entre las partículas de vidrio templado y agregado pétreo. Una vez presentes los lineamientos se compararán los resultados de una mezcla convencional como la norma lo indica; con un concreto asfáltico en caliente con residuos de vidrio templado y cal como agregado para determinar sus propiedades físicas y mecánicas por medio de ensayos de laboratorio.

1. ANTECEDENTES

1.1. Estudios previos de mezcla asfáltica en caliente

Previo a la realización de esta investigación, se citaron varios estudios similares, de los cuales se presenta de forma breve los objetivos planteados por el autor, así como también algunas conclusiones y recomendaciones para cada uno de los estudios.

1.1.1. Criterios para el diseño de mezcla asfáltica en caliente

Con el propósito de crear una guía básica sobre los criterios para el diseño de mezcla asfáltica en caliente, el autor nos proporciona los conceptos generales para el diseño y sus diferentes etapas de que consta el proceso de producción de una mezcla asfáltica. Asimismo, se desarrolla un proyecto que permita establecer un prototipo para el desarrollo del diseño de mezcla asfáltica.

También nos da a conocer los análisis y ensayos, así como las especificaciones técnicas para lograr que todos los agregados minerales, mezclas y productos asfálticos cumplan con los requisitos de diseño y, de este modo, garanticen una mejor inversión y durabilidad en el proyecto.

Todo el estudio el autor lo realizó bajo las especificaciones utilizadas y aprobadas en Guatemala.

1.1.1.1. Autor: José Luis León Fajardo

Para el estudio *criterios para el diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente*, el autor, Ingeniero José Luis León Fajardo, presenta dicho trabajo de investigación en octubre de 1996, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad San Carlos de Guatemala, con el objetivo de dar los conceptos generales para el diseño y sus diferentes etapas, en que consta el proceso de producción de una mezcla asfáltica. Asimismo, desarrollar un proyecto que permita establecer un prototipo para el desarrollo del diseño de mezcla asfáltica.

1.1.1.2. Conclusiones

Luego de todos los estudios realizados y ensayos correspondientes para dicha investigación, el autor nos da las conclusiones a las que llegó, de las cuales se presentan algunas de las más importantes:

- Cuando se elaboró la primera propuesta de mezcla no se tuvo el cuidado de controlar el filler, por lo tanto los resultados estuvieron fuera de especificación, cuando ya se le elaboraron las pruebas respectivas y se llevó un buen control al filler para la segunda propuesta, se observó una gran diferencia en la aceptación de la mezcla.
- Nos indica que el cemento asfáltico 60-70, conforme las pruebas de laboratorio realizadas, cumple con las especificaciones M 20 por lo tanto, se puede utilizar en el diseño de mezcla, tomando las precauciones necesarias.

- Los agregados utilizados en el presente trabajo, deben llevar un control en la graduación de los mismos ya que contienen muchos finos y esto influye en forma directa en su uniformidad y adaptabilidad hacia la mezcla asfáltica.
- Por último, nos dice que los métodos empleados en Guatemala para el diseño y selección del pavimento a usarse, son adoptados de otros países y, por lo tanto, concebidos para las condiciones y requerimientos propios del lugar de origen. Al hacerse uso de ellos, el ingeniero deberá tener en cuenta que las condiciones no son, necesariamente, iguales en Guatemala y que el empleo de dichos métodos estará condicionado a la clase de información local con la que cuente.

1.1.1.3. Recomendaciones

Posterior a describir sus conclusiones, el autor nos presenta las recomendaciones necesarias que él considera, para que el estudio realizado sea óptimo y poder así llegar alcanzar todos los objetivos propuestos:

- Nos indica que actualmente en Guatemala se ha intensificado la construcción de obras viales, por lo cual se ha incrementado la demanda de profesionales conocedores de la materia. Se recomienda que la Facultad de Ingeniería a través de la Escuela de Ingeniería Civil y del Laboratorio de Suelos del Centro de Investigaciones de Ingeniería, establezca cursos y laboratorios para dar conocimiento necesario sobre la materia tratado en esta tesis.
- En Guatemala se deben revisar las especificaciones de la Dirección General de Caminos y actualizarlas, tomando en cuenta las especificaciones actuales del Instituto de Asfaltos.

- Que el diseño de mezcla asfáltica y su reconstrucción se realice de acuerdo con el tipo de tránsito esperado, tomando en consideración su evolución en el tiempo de diseño, para que, una mezcla asfáltica pueda tener larga duración, tomando en cuenta también sus obras en las cuales figuran todas las instalaciones subterráneas.

1.1.2. Producción de mezclas asfálticas en caliente

Con el objetivo general de dejar una guía que pueda ser utilizada por estudiantes y profesionales de la Ingeniería Civil, que se enfrenten con la necesidad de adquirir conocimientos sobre la producción de mezclas asfálticas en caliente, el autor realiza los estudios necesarios, respaldado con los diferentes ensayos, con el fin de proveer la información necesaria para el desarrollo de la producción de las mezclas asfálticas en caliente, que se utilizan actualmente; así como también dar a conocer la forma en que se trabajan los agregados y el asfalto, como los distintos tipos utilizados para la producción de las mezclas asfálticas en caliente.

1.1.2.1. Autor: Erick Rolando Anleu Hernández

En el estudio de la producción de mezclas asfálticas en caliente, es importante mencionar que el autor, Ingeniero Erick Rolando Anleu Hernández que en el 2002, al conferírsele el título de Ingeniero Civil, presenta ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el trabajo de graduación, con el objetivo de ofrecer información necesaria mostrando los procesos constructivos, herramientas de laboratorio, trabajos realizados en planta de dosificación, sobre los conocimientos necesarios en la producción de mezclas asfálticas en caliente.

1.1.2.2. Conclusiones

Luego de la investigación necesaria para elaborar el informe final, el autor nos da a conocer algunas de las conclusiones a las que él llegó:

- Los agregados constituyen más del 75 % del volumen de las mezclas asfálticas en caliente y por ello es indispensable que su costo sea lo más bajo posible, puesto que su incidencia es determinante para obtener el precio final.
- El diseño de las mezclas asfálticas en caliente se utiliza como parámetro comparativo al obtener los resultados de los ensayos realizados, para establecer si la mezcla producida cumple satisfactoriamente con los parámetros y requerimientos establecidos.
- Para producir mezclas asfálticas en caliente de alta calidad se debe contar con un sistema adecuado de inspección y ensayos, así como conocer el funcionamiento de todo el equipo utilizado en las plantas de producción, dependiendo si es de dosificación o mezcladora de tambor. De la correcta administración de una planta de producción de mezclas asfálticas en caliente dependerá que todas las actividades se desarrollen adecuadamente y así garantizar que los costos de producción no sean tan altos.

1.1.2.3. Recomendaciones

Posteriormente, en las conclusiones dadas en la investigación, nos hace saber algunas recomendaciones, con las cuales el trabajo sea óptimo y positivo en cumplimiento de los objetivos propuestos:

- Tomar precauciones para prevenir heridas por quemaduras y gases venenosos, debido a que el asfalto es un hidrocarburo que se mantiene caliente durante su almacenaje, manejo y muestreo.
- Manejar los agregados de tal manera que se evite su contaminación y disminuya la posibilidad de que las partículas más grandes se separen, pues esto ocasionaría variaciones en la graduación de la mezcla asfáltica en caliente.
- Tener un registro estricto de los muestreos, ensayos y resultados de estos por cada día de producción.
- Realizar inspecciones visuales de la mezcla asfáltica en caliente para disminuir al mínimo las deficiencias, puesto que la mayoría pueden ser detectadas por personal con suficiente experiencia en este campo.
- Evaluar los gastos, en lo que se refiere a tiempos de producción, horas máquina, combustibles, mantenimiento y valor de los agregados puestos en planta, utilizando para esto un sistema cruzado de control que permita detectar cualquier anomalía.

1.1.3. Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente

Con el propósito de proporcionar una guía para la rehabilitación de pavimentos utilizando las técnicas de reciclado en frío *in-situ* y la tecnología de asfalto espumado, mostrando los procesos constructivos, herramientas de laboratorio y maquinaria requerida para el reciclado del pavimento asfáltico, el autor realiza un documento que recopila la diversidad de parámetros que se deben tomar en cuenta al momento de comenzar el análisis de un tramo vial para el diseño y ejecución de la rehabilitación de pavimento, tales como las características de la ruta, demografía, nivel de circulación de tránsito.

Así también nos hace conocer el funcionamiento del reciclado en frío *in-situ*, así como sus propiedades, equipos utilizados y ventajas del sistema, para que se pueda recopilar e instruirse de la tecnología del Asfalto Espumado, sus características, usos, aplicaciones, procedimiento de trabajo y ventajas.

Este documento tendría la información necesaria para que el estudiante, profesional de ingeniería o el lector, posea una guía y así pueda conocer la variedad de fallas que pueden aparecer en los pavimentos flexibles, así como las posibles causas que las originaron.

1.1.3.1. Autor: Víctor Alejandro Rosales Castañeda

En el estudio de la rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado reciclando el pavimento asfáltico existente, es importante mencionar que el autor, Ingeniero Víctor Alejandro Rosales Castañeda que en el 2011, al conferírsele el título de Ingeniero Civil, presenta ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, el

trabajo de graduación de tesis, con el objetivo de ofrecer información necesaria mostrando los procesos constructivos, herramientas de laboratorio y maquinaria requerida para el reciclado del pavimento asfáltico.

1.1.3.2. Conclusiones

Luego de los estudios y ensayos necesarios correspondientes para dicho tema, el autor nos indica y presenta las conclusiones a las que llegó:

- Con base en la experiencia en cuanto al diseño y evaluación de pavimentos, se puede afirmar que una parte fundamental para determinar el tipo de rehabilitación a aplicar en una ruta existente, es la evaluación visual preliminar de la misma. Por medio de esta evaluación preliminar se logra la identificación de las fallas que posea la carpeta asfáltica de rodadura y de estar expuestas las capas subyacentes.
- Diversos estudios y proyectos, tanto nacionales como internacionales, han demostrado que el reciclado en frío es una opción que provee al pavimento de una importante mejora en cuanto al aporte estructural, ya que la capa de base, al ser mezclada con la carpeta de rodadura, mejora sus características físicas y mecánicas. Así mismo, la aplicación de esta técnica genera un ahorro significativo de recursos, tanto humanos como económicos y reduce considerablemente los impactos ambientales en el proyecto.
- Aplicada la técnica del reciclado en frío se produce una mejora sustancial a la estructura de pavimento, y esto en conjunto con la estabilización con asfalto espumado el aporte aumenta aún más, proporcionando una capa de base estabilizada con propiedades mecánicas que aseguran un pavimento

más duradero. También representa una buena opción para caminos de terracería.

- Realizar el diseño de la mezcla de materiales con asfalto espumado siguiendo los procedimientos establecidos en las normas y utilizando el equipo adecuado, asegurará la optimización de recursos del proyecto.
- Asegurar el control de calidad de los materiales, del proceso de reciclado, de los agentes estabilizadores a utilizar y del proceso constructivo en sí, proporcionará los resultados esperados de la obra y asegurará que se mantenga en óptimas condiciones para el período de diseño estipulado.

1.1.3.3. Recomendaciones

Posteriormente, nos presenta las recomendaciones necesarias que él considera, para que el estudio realizado sea óptimo y poder así llegar a los objetivos planteados:

- Es de suma importancia que durante la evaluación del tramo a rehabilitar mediante la realización de pozos a cielo abierto, se efectúe de forma correcta la toma de espesores y de muestras de las capas existentes en la estructura de pavimento. Esto servirá para determinar los espesores disponibles de las capas de rodadura y de base a reciclar y estabilizar con asfalto espumado, y si surgiera el caso, realizar los ajustes de espesores necesarios.
- La realización de los ensayos de laboratorio a los materiales existentes, representan una parte fundamental para el reciclado en frío y posterior estabilización con asfalto espumado, debido a que con ellos se establecerá

la compatibilidad de los mismos y el aporte que puedan dar a la nueva estructura de pavimento. Por tal motivo, se recomienda contar con el equipo de laboratorio necesario para el análisis de los materiales y para el diseño de mezcla con asfalto espumado, así como para llevar un control de calidad efectivo.

- Es imprescindible conocer las características necesarias para el correcto funcionamiento y manejo de la máquina recicladora con que se cuente, y de los componentes de la misma, para obtener un rendimiento óptimo durante la rehabilitación con el reciclado en frío y estabilización con asfalto espumado.
- Como en todo proyecto de construcción, resulta de suma importancia mantener un estricto control de calidad del proyecto de rehabilitación mediante el reciclado en frío y estabilizado con asfalto espumado. Mantener un buen control de calidad de los materiales a utilizar, de los agentes estabilizadores, de la maquinaria y del proceso constructivo, asegurará el buen funcionamiento del pavimento para el período establecido de vida útil.

1.1.4. Utilización de desecho de vidrio templado como árido grueso para la elaboración de concreto

Con fines de crear una guía básica y poder así analizar si las características y propiedades mecánicas del concreto se ven afectadas de manera significativa al sustituir el árido natural con vidrio templado triturado, el autor desarrolla el tema de la utilización de desecho de vidrio templado como árido grueso para la elaboración de concreto.

Informe en el cual se recopile la información necesaria para que el estudiante, profesional de ingeniería o el lector, posea una guía básica obtenida mediante documentos bibliográficos, datos de laboratorio y experiencia en el campo de la metodología y poder así conocer el porcentaje máximo de vidrio templado reciclado que se puede sustituir al árido natural para no alterar la manejabilidad; así como también verificar a qué se debe la mala fluidez de las mezclas de concreto al sustituir los diferentes porcentajes de vidrio templado, conocer qué tanto se afecta el asentamiento en las mezclas con sustituciones de vidrio templado, y poder así verificar que el peso unitario entre la mezcla patrón y las mezclas con adiciones de vidrio templado no tienen gran variación, para dar a conocer los posibles usos que pueden tener las mezclas con sustituciones de vidrio templado.

1.1.4.1. Autor: Carlos Eduardo Suque Soc

Para el estudio de la utilización de desecho de vidrio templado como árido grueso para la elaboración de concreto, el autor, Ingeniero Carlos Eduardo Suque Soc, presenta dicho trabajo de investigación en septiembre de 2016, ante la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, con el objetivo de ofrecer información necesaria para

poder determinar si es factible la utilización del vidrio templado como árido grueso en la elaboración de concreto y poder así mediante la investigación dar a conocer las conclusiones y recomendaciones que hagan de dicho estudio un resultado positivo del mismo.

1.1.4.2. Conclusiones

Luego de los ensayos normados a los que fueron sometidos los cilindros de mezcla de vidrio templado con concreto, el autor concluye que:

- En una mezcla de concreto, al sustituir el árido natural con diferentes porcentajes de vidrio templado, las características físicas y propiedades mecánicas sí cambian.
- Al sustituir vidrio templado en las mezclas de concreto, estas se vuelven muy pastosas y estables, pero con mala fluidez. Este comportamiento se debe al hecho de que los fragmentos de vidrio templado triturado son más angulosos y lisos, elevando los requerimientos de pasta a valores que impactan negativamente la economía de la mezcla.
- Al aumentar el porcentaje de vidrio templado el asentamiento disminuye, lo cual indica que al sustituir porcentajes de vidrio templado arriba del 60 % este valor quedaría fuera del parámetro de calidad establecido en la norma.
- La gravedad específica del agregado pétreo era similar a la gravedad específica del vidrio templado; por ello, al mezclar los dos materiales, el peso unitario entre una mezcla y otra no tuvo una gran variación.

- Este tipo de mezclas se limita a usos no estructurales, como lo son aceras, banquetas, rellenos, cunetas, entre otros usos, siempre y cuando el concreto no sea sometido a esfuerzos que provoquen la falla de este.

1.1.4.3. Recomendaciones

Posteriormente nos presenta las recomendaciones necesarias que él considera, para que el estudio realizado sea óptimo y poder así llegar a los objetivos planteados:

- Investigar sobre otros tipos de materiales que se podrían utilizar como agregados reciclados en mezclas de concreto.
- Evitar las sustituciones de porcentajes de vidrio templado mayores al 50 %, ya que el concreto se vuelve muy frágil.
- Usar un material reciclado que sea lo menos angulosos posible, ya que impacta de forma negativa a la mezcla de concreto.
- Cuando se desee elaborar mezclas con sustituciones de vidrio templado verificar que el asentamiento este dentro del valor mínimo o máximo del establecido en norma.
- Siempre que se lleve a cabo el ensayo de peso unitario tomar en cuenta los parámetros establecidos en la Norma, para que el valor obtenido sea confiable.
- Tener presente que este tipo de concreto no cumple con las características físico-mecánicas de un concreto estructural.

2. VIDRIO TEMPLADO Y CAL HIDRATADA

2.1. Historia del vidrio.

“A lo largo de los siglos, el vidrio ha sido un material muy utilizado como cerramiento de vanos en edificios de muy diversa índole. Su uso, en toda una variedad de tamaños, colores y formas, se ha visto facilitado por una serie de características inherentes a este material, las cuales han sufrido pocos cambios con el paso de los siglos. Sus ventajas principales sobre otros materiales son propiedades de translucidez y transparencia, aislamiento térmico y acústico. Es de relativo bajo costo de producción, su dureza, y facilidad para ser decorado y transformar la luz que penetra en el interior de un espacio. Actualmente, el vidrio templado, en sus múltiples variantes, si bien tiene que competir y convivir con otros productos sigue siendo uno de los materiales más versátiles utilizados en la construcción, cuyo futuro ofrece insospechadas posibilidades”¹

- Los orígenes

Los primeros vidrios utilizados como cerramiento de ventanas en edificios públicos romanos, posiblemente hacia el siglo I d.C., eran vidrio templados planos fabricados mediante el método de vertido o colado en mesas, moldes o bandejas, cuya superficie podía ser de metal, piedra, mármol o madera humedecida.

El tamaño de las distintas láminas obtenidas podía ser de superficies relativamente grandes, siendo las de mayor tamaño encofradas de 100 cm x 70 cm, en unas termas de la ciudad de Pompeya. Su espesor medio oscilaba entre

¹ *El Vidrio*. <https://es.scribd.com/document/270085003/EL-VIDRIO>. Consulta: 20 de octubre de 2017.

los 2 mm y 15 mm. Para cubrir todo el hueco de los ventanales era necesario seccionarlo mediante marcos sostenibles en madera, cobre o escayola, los cuales cumplían también una función decorativa. Este tipo de ventanas esta conocido como claustra.

- El soplado del vidrio con caña

“El método de fabricación del vidrio, mediante la técnica de soplado a boca, desarrollado en Siria durante el período romano entre los siglos I y II a.C., supuso una gran revolución en la técnica y artesanía del vidrio templado y también, en la historia de la construcción. Este acontecimiento permitió la fabricación de láminas de vidrio templado de mayor tamaño, que facilitó el acristalamiento de ventanales cada vez más grandes y de forma más económica en los edificios. Otra de las ventajas que supuso el soplado de vidrio templado, mediante el empleo de caña, fue una mejoría sustancial en su calidad, ya que para ser trabajado por esta técnica se requieren temperaturas considerablemente más elevadas que las que exige el trabajo de las pastas de vidrio templado.”²

- El desarrollo del arte de la vidriería

La segunda gran innovación técnica y artística mencionada, la vidriería, consiste en cerrar el vano de un ventanal mediante paneles compuestos por pequeños fragmentos de vidrio templado plano unidos entre sí mediante varillas de plomo. Según algunos autores, el origen de la vidriería habría que buscarlo en las celosías de vidrio templados coloreados, utilizados como cerramientos de edificios en el mundo islámico. Su introducción en Europa se produjo a través de los contactos del mundo cristiano con Bizancio y la España musulmana, alcanzando su apogeo y sus máximas cotas de expresividad durante el arte romano y especialmente el gótico.

² *El Vidrio*. <https://es.scribd.com/document/270085003/EL-VIDRIO>. Consulta: 20 de octubre de 2017.

- La vidriería como juego de luces y colores

El uso de vidrio de colores emplomados como cerramiento de los ventanales de las iglesias tenía un atractivo especial para el cristianismo durante la Edad Media, dadas las múltiples posibilidades decorativas, simbólicas, didácticas y propagandísticas que ofrecía, de ahí su rápida difusión. El simbolismo de la luz y la búsqueda de efectos de luz y color en el interior de los templos cristianos, fueron una constante durante la Edad Media, ya que la luz estaba asociada a Dios.

- Los avances en la industria del vidrio

En lo concerniente a los aspectos técnicos, de la fabricación del vidrio plano, se puede apreciar a partir del siglo XV y especialmente en el XVI, una serie de cambios importantes. Por un lado, se produce una disminución del grosor del vidrio, los cuales seguían siendo fabricados por el método de soplado a boca en forma de cilindros o discos.

Posiblemente el perfeccionamiento, en la técnica del soplado a boca, en combinación con un deseo de más luminosidad y, seguramente la reducción de costos, condujo a la fabricación de vidrio más delgados y, por lo tanto, más luminosos. Al mismo tiempo, la calidad del vidrio mejora al utilizarse en su composición sodio en lugar de potasio, lo que aumenta su resistencia al deterioro químico. Por otro lado, los cambios estéticos producidos durante los períodos de Renacimiento y Barroco, supusieron la transformación de la vidriería en un arte pictórico sobre un medio translúcido o en una vidriería incolora. Este cambio condujo a una reducción de la red de plomo, a fin de favorecer una mayor calidad compositiva y pictórica, y un aumento del tamaño

de los vidrios. Estos son entendidos ahora como material de cerramiento o, en el mejor de los casos, como soporte de las escenas sobre ellos pintadas.

- **Arquitectura en vidrio y renovación de la vidriería**

“Como consecuencia de todos estos avances, surgió paralelamente un tipo de arquitectura civil donde el hierro y el vidrio templado, normalmente transparente y sin decoración, ganarán espacio en muros y cubiertas, permitiendo el acristalamiento de grandes superficies y el nacimiento de una arquitectura translúcida.”³

El término Polímero tiene su origen del griego poli (muchos) y meros (parte), un polímero es un material que está compuesto por varias unidades repetidas de partes conectadas. La materia para la realización de un polímero es un monómero, esto quiere decir una partícula con una repetición continua.

2.2. Composición del vidrio templado

El vidrio común o vidrio templado, también denominado vidrio de silicato sodocálcico, está compuesto por:

Tabla I. **Composición del vidrio templado**

Elemento	Porcentaje %
Sílice (SiO ₂), material vitrificante	69 a 74
Óxido de sodio (Na ₂ O), fundente	12 a 16

³ *El Vidrio*. <https://es.scribd.com/document/270085003/EL-VIDRIO>. Consulta: 20 de octubre de 2017.

Continuación de la tabla I.

Óxido de calcio (CaO), estabilizante	5 a 12
Óxido de magnesio (MgO)	0 a 6
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	0 a 3

Fuente: elaboración propia.

Además de estos componentes, el vidrio templado puede contener también pequeñas cantidades de otras sustancias como el boro en un 3-4 %, potasio en un 0-1 %.

2.3. Proceso de fabricación del vidrio templado⁴

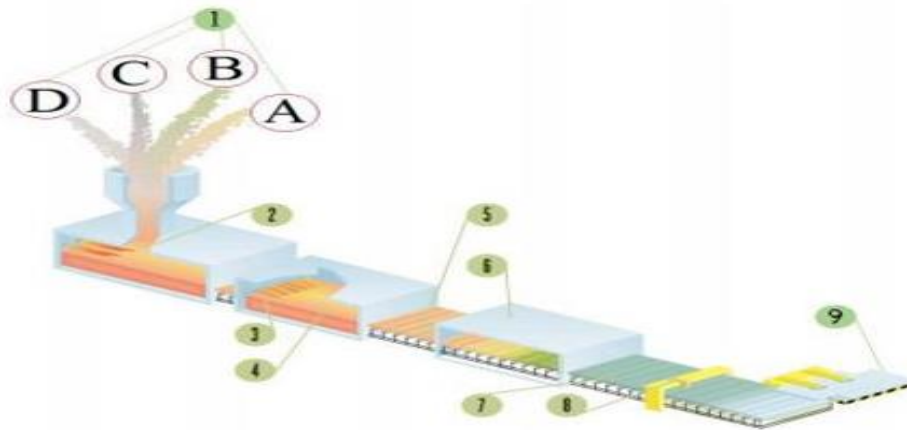
A continuación, se describe cómo es el proceso paso a paso, para la fabricación del vidrio templado.

- Paso 1: para la producción del vidrio templado se emplea una mezcla de materias primas, que se introducen en un depósito llamado tolva.
- Paso 2: se funde la mezcla de arena, álcali y óxidos metálicos en un horno para obtener cristal líquido (entre 1 500 y 2 000 °C). El fuego lo mantiene caliente y fluido.
- Paso 3: para que la superficie sea lisa y libre de imperfecciones, se pule al fuego en el mismo baño de flotación. De esta manera se obtiene el vidrio con ambos lados planos y paralelos entre sí.

⁴ *El Vidrio*. <https://es.scribd.com/document/270085003/EL-VIDRIO>. Consulta: 22 de octubre de 2017.

- Paso 4: sobre el metal líquido se vierte el vidrio fundido, que flota sobre él, de forma que el vidrio se extiende formando una película plana y de grosor homogéneo.
- Paso 5: el vidrio templado flota sobre el estaño a 1 000 °C. En este depósito se va enfriando y solidificando.
- Paso 6: el vidrio templado es ahora pegajoso y viscoso, pero tiene la suficiente consistencia para permitir el resto del proceso.
- Paso 7: en un horno y túnel se vuelve a calentar el vidrio templado sin llegar a fundirlo.
- Paso 8: se deja enfriar lentamente para que no se agriete.
- Paso 9: un diamante corta el cristal.
- Paso 10: resultado final: vidrio templado de tres metros de ancho, tres metros de largo y diferentes espesores.

Figura 1. Descripción del proceso de fabricación del vidrio templado



Fuente: IRUSTA, Manuel. *Proceso fabricación del vidrio templado*. p. 1.

La materia prima va ingresando, según el volumen requerido (dosificación) y cada material está representado de la siguiente manera (ver figura 1).

- Arena: es el principal componente, representa con la letra (A).
- Carbonato de sulfato de sodio: sirve para que la arena se funda a menor temperatura se representa con la letra (B).
- Piedra caliza: sirve para que el cristal no se descomponga en el agua se presenta con la letra (C).
- Cristal reciclado: su uso es ecológico porque ahora el gasto de las otras materias primas se representa con la letra (D).

2.4. Características del vidrio⁵

Los vidrios son materiales cerámicos no cristalinos. Se denominan como materiales amorfos e inorgánicos, de fusión, que se ha enfriado a una condición rígida sin cristalizarse. Además, es una materia inerte, compuesta principalmente de silicatos. Es duro y resistente al desgaste, a la corrosión y a la compresión.

2.4.1.1. Características físicas

El vidrio es una sustancia amorfa porque no es ni un sólido ni un líquido, sino que se halla en un estado vítreo en el que las unidades moleculares, aunque están dispuestas de forma desordenada, tienen suficiente cohesión para presentar rigidez mecánica. El vidrio se enfría hasta solidificarse sin que se produzca cristalización; el calentamiento puede devolverle su forma líquida. Suele ser transparente, pero también puede ser traslúcido u opaco. El vidrio fundido es maleable y se le puede dar forma mediante diversas técnicas. En frío, puede ser tallado. A bajas temperaturas es quebradizo y se rompe con fractura concoidea (en forma de concha de mar).

2.4.1.2. Color

El color es originado por elementos que se agregan en el proceso de fusión, llamados colorantes. Estos se van agregando en el momento de la fundición, y se le agregan según el color que se desea. (Ver tabla II).

⁵ Trabajo Final de Proceso de Manufactura y Tecnología de Materiales. http://www.academia.edu/29058870/Trabajo_Final_de_Proceso_de_Manufactura_y_Tecnolog%C3%ADa_de_Materiales. Consulta: 30 de octubre de 2017.

Tabla II. **Colorantes del vidrio templado**

Elemento	Color
Óxido de cobalto	Rojo azulado
Óxido ferroso	Azul
Óxido férrico	Amarillo
Óxido de cromo	Verde grisáceo
Trióxido de cromo	Amarillo
Óxido de cobre	Verde azulado
Óxido de uranio	Verde amarillento fosforescente
Selenio elemental	Rosa
Sulfuro de cadmio coloidal	Amarillo

Fuente: Norma IRAM 12 585, *colorantes del vidrio templado*. p. 4.

2.4.1.3. Textura

Un vidrio completamente fundido presenta un brillo característico, porque el vidrio templado se nivela y aplanar cuando se funde, formando una superficie extremadamente lisa y homogénea. Esto es una muy buena característica del material, pues lo hace más fácil de limpiar. Cuando un vidrio templado no se funde completamente en el proceso de cocción, la viscosidad es todavía alta, la superficie resulta ser rugosa y por lo tanto con tendencia a mate. (El vidrio templado mate es a la vez opaco por el defecto en la aspereza de su superficie haciendo que no haya transparencia).

2.4.1.4. Peso

El peso en los vidrios difiere de acuerdo a su composición y a la densidad de los vidrios.

2.4.1.5. Maleabilidad

Los vidrios presentan maleabilidad cuando se encuentran en su etapa de fundición, pues pueden ser moldeados. La etapa de maleabilidad del vidrio templado es cuando se les da la forma deseada, ya sea por moldes o por cualquier otro método. Los principales métodos empleados para moldear el vidrio templado son el colado, soplado, prensado, estirado y laminado.

2.4.2. Propiedades mecánicas

El comportamiento del vidrio bajo esfuerzos depende de varios factores: la rigidez de los enlaces entre las moléculas que lo constituyen y principalmente el estado de su superficie. La resistencia mecánica real del vidrio está muy por debajo de su resistencia teórica, durante su uso el vidrio puede estar sometido a esfuerzos mecánicos de diferente tipo: flexión, impacto y dureza.

2.4.2.1. Flexión

La resistencia a la flexión es una propiedad del vidrio muy importante. Esto porque el vidrio está expuesto a este tipo de esfuerzo en la mayoría de los casos y es una manera de poner a prueba su resistencia.

2.4.2.2. Impacto

Cuando se habla de ensayo de impacto, para el vidrio, es importante mencionar que existen diferentes tipos de vidrio. Entre ellos están: el vidrio común o templado y el laminar. El vidrio común por no tener una estructura interna absorbe muy poco la energía de impacto, razón por la cual al momento de la falla de sus fragmentos salen volando de una manera explosiva y

repentina. Esto sin dar algún tipo de advertencia como pequeñas fisuras antes del momento de falla. Esto lo hace comportarse como un material frágil.

2.4.2.3. Dureza

Es una característica intrínseca del material. Esta depende de la densidad, y de la composición química, se manifiesta como la dificultad de romperse, ser penetrado y rayado por otros cuerpos o materiales.

2.4.3. Características químicas

El vidrio es un material que resiste la mayoría de los agentes químicos y atmosféricos. Es muy resistente al agua, a las soluciones neutras y ácidas, a los ácidos fuertes y sus mezclas. También con tiempos de exposición prolongados y temperaturas superiores a 100 °C, su resistencia química supera a la de la mayoría de los materiales y otros materiales. Mediante la acción del agua y los ácidos, únicamente se desprende del vidrio templado una minúscula capa.

2.4.3.1. Resistencia al agua

El agua ataca al vidrio disolviendo algunos de sus componentes, lo que se manifiesta por pequeñas pérdidas de masa. La intensidad del agua que depende de varios factores: temperatura, tiempo de contacto, composición del vidrio, agitación y el estado de la superficie. A temperatura ambiente el ataque es insignificante, la pérdida de masa después de estar sumergido durante horas es prácticamente inapreciable. Al aumentar la temperatura la intensidad del ataque crece exponencialmente.

2.4.3.2. Resistencia a los ácidos

El efecto de las actuaciones de ácido, sobre la superficie del vidrio, es despreciable. Se disuelven desde el vidrio, en muy pequeñas cantidades, iones preferentemente monovalentes. Con ello se forma una capa de gel de sílice, muy delgada y poco porosa sobre la superficie del vidrio, que inhibe un ataque posterior. Una excepción la constituyen el ácido fluorhídrico y el ácido fosfórico concentrado y caliente, que evitan la formación de la capa pasiva.

2.4.3.3. Resistencia a los agentes atmosféricos

El ataque del vidrio por agentes atmosféricos puede ocasionar la aparición en su superficie de manchas y escamas. El principal responsable de dicho ataque es el agua contenida en la atmósfera que se condensa frecuentemente sobre la superficie fría del vidrio. Esta pequeña cantidad de agua superficial es más peligrosa que gran cantidad de agua fluyendo, ya que da lugar a una disolución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH) que ataca al vidrio. Resulta por consiguiente aconsejable evitar en lo posible la condensación.

2.5. Proceso de transformación del vidrio templado⁶

El vidrio templado no se clasifica como vidrio de seguridad, ya que posee un patrón de rotura similar al del vidrio recocido. Su uso es adecuado en aplicaciones sujetas a tensiones térmicas, pero que no exijan requisitos de seguridad.

A continuación, se explica paso a paso el proceso de transformación:

- Paso 1: corte de piezas: el vidrio templado se puede producir, bien en dimensiones estándar o bien en medida fija según las especificaciones del cliente.
- Paso 2: manufactura: el vidrio templado se suele utilizar en aplicaciones en las que el vidrio templado va a soportar un alto esfuerzo mecánico. (Por ejemplo: en puertas, paneles laterales, vehículos y otros).
- Paso 3: limpieza: cada panel se limpia cuidadosamente bajo condiciones controladas para asegurar que ninguna impureza altere la superficie del vidrio templado.
- Paso 4: tratamiento térmico: una vez que el vidrio templado es cortado a medida, manufacturado y limpiado, se calienta en un horno hasta una temperatura de 620 °C, justo por encima del punto de fusión de este material.

⁶ *Manual del Vidrio Plano*. <https://studylib.es/doc/4512002/manual-del-vidrio-plano>. Consulta: 2 de noviembre de 2017.

- Paso 5: proceso de templado: el vidrio es enfriado bruscamente por medio de un flujo de turbinas de aire que hacen que se contraiga la superficie. El núcleo interno del vidrio tarda más tiempo en enfriarse, lo que da lugar a tensiones de tracción permanente. La superficie adquiere la rigidez antes que en las capas internas que aún se encuentran en estado plástico, de este modo la superficie del vidrio queda sometida a fuerzas de compresión. Este proceso confiere al material resistencias mecánicas y térmicas muy superiores a las que tiene un vidrio sin templar.
- Paso 6: etiquetado, embalaje y transporte: las etiquetas con todos los detalles del pedido se colocan una vez que el vidrio templado está terminado.

Para una mejor manipulación y transporte, del mismo, suele colocarse sobre caballetes especiales para este uso.

2.6. Tipos de vidrio ⁷

Cuando la materia prima se le agregan distintos compuestos químicos, se obtienen diferentes tipos de vidrio. Con base en su composición química se puede hacer una clasificación como la que aparece a continuación:

- Vidrio duro: este es de elevado punto de fusión, contiene carbonato potásico y sirve para fabricar tubos y utensilios de laboratorio que han de resistir altas temperaturas.

⁷ *Manual del Vidrio Plano*. <https://studylib.es/doc/4512002/manual-del-vidrio-plano>. Consulta: 2 de noviembre de 2017.

- Fibra de vidrio: filamentos que son utilizados frecuentemente en láminas para la construcción de embarcaciones pequeñas.
- Vidrio Flint: especial con un elevado índice de refracción. Es muy utilizado en óptica y también se emplea con fines decorativos.
- Vidrio o ligero: es utilizado generalmente en la fabricación de envases.
- Vidrio Pyrex: nombre comercial del vidrio con pequeño coeficiente de dilatación térmica, por lo que es muy resistente a las altas temperaturas.
- Vidrio de Jena: de gran resistencia a los agentes químicos y de bajo coeficiente de dilatación, se utiliza en la fabricación de utensilios para laboratorio.
- Vidrio templado: el que en caso de rotura, se reduce a fragmentos pequeños no cortantes. Esto para su obtención, pues en vez de sufrir el tratamiento de recocido, se enfría bruscamente desde temperaturas.
- Vidrio calizo: es el vidrio común. Está formado de manera dominante por sílice, así como por calcio y sodio. El vidrio calizo sirve para la fabricación de vasos, vajillas, mesas, ventanas y otros enseres. Actualmente, su elaboración ha mejorado considerablemente, ya que si se le agrega una mayor cantidad de sílice, experimenta una resistencia al choque térmico superior. Como ejemplo se pueden mencionar algunos productos de Crisa (tazas y vasos), que resisten con facilidad líquidos calientes, fríos y soportan los impactos.

2.7. Problemas ambientales derivados de su mala disposición

Hace años el planeta viene acumulando millones de objetos de vidrio y la naturaleza no sabe ahora qué hacer con ellos. Ya que cada objeto de este material dura hasta 4 000 años en desintegrarse, mientras tanto, el vidrio convive con personas, animales y plantas, y su impacto ya es evidente en el fondo de lagos y ríos, acumulación desordenada de desechos de vidrio en terrenos al aire libre, fragmentos del mismo en drenajes.

Aunque el vidrio templado en sí mismo no constituye una amenaza para el medio ambiente porque es inerte, aunque no es biodegradable. Si se expone a las fuerzas de erosión, el vidrio se rompe en pequeños trozos de sílice, arena de playa, uno de los elementos más comunes en la tierra.

2.8. Formas de reciclaje actuales

El reciclado es una forma de ayudar al medio ambiente, por medio de la reutilización de materiales. En este caso específicamente: el vidrio templado.

2.8.1. Reciclaje tradicional

El vidrio para reciclaje es recogido o separado de la basura. Esto generalmente sucede en un vertedero, en el hogar o en cualquier otro lugar en el que el envase termina de ser útil y es clasificado por color (verde, ámbar y claro). En la mayoría de los casos el vidrio es triturado para disminuir su volumen, mientras se almacena o bien para hacer más eficiente su traslado. Sin embargo, la rotura del vidrio no es deseable si se produce antes de la separación por colores, pues no es fácil separar el vidrio roto del resto de los

residuos mezclados, pasando a convertirse en un material de vidrio mezclado que no tiene valor real.

El vidrio de envase es un material de baja densidad hasta que se rompe o tritura. Entonces se convierte en un material de alta densidad. Normalmente se almacena el vidrio hasta acumular la cantidad suficiente de un color que posibilite un transporte rentable. Los vidrios rotos se transportan frecuentemente como material a granel en grandes contenedores. Ocasionalmente se utilizan contenedores más pequeños para transportar cantidades menores de vidrio limpio y de color uniforme hasta un centro de acopio o bien es transportado directamente a la planta de transformación.

En el proceso de reciclaje de vidrio, las materias primas vírgenes son sustituidas por vidrio templado recuperado. El proceso de reciclado no es un evento aislado de la preparación de la materia prima virgen, sino paralelo en un principio para luego converger en un punto común.

2.8.2. Otras formas de reciclado de vidrio templado

El vidrio se utiliza, o puede ser utilizado, en la fabricación de lo siguiente:

- *Glassphalt*, un asfalto con un porcentaje de vidrio triturado que se utiliza en las carreteras.
- Materiales de edificación y construcción, tales como ladrillos, tejas de arcilla y bloques. También árido ligero para el hormigón y los plásticos. Así como compuestos de polímeros de vidrio y *foamglass* para tablas de construcción y aislamiento.

- Pintura reflectante para señales viales, elaborada con pequeñas esferas de vidrio.
- Aislamiento de lana de vidrio.
- Postes para cables telefónicos y para vallas, mezclando vidrios rotos con polímeros plásticos.
- Enmiendas de suelo para mejorar el drenaje y la distribución de la humedad y arena artificial para la restauración de playas y abrasivos.

2.9. Manejo actual de residuos a nivel nacional

Hace más de 51 años apareció en Guatemala la industria del vidrio como respuesta a una demanda de empaques de vidrio templado utilizados en la industria de bebidas carbonatadas, cerveza, alimentos, medicina y licores. Como consecuencia del desarrollo de la industria vidriera, se empezaron a generar grandes volúmenes de residuos de vidrio especialmente en las fábricas de alimento que requieren de envases. Desde allí se inicia el traslado de las primeras toneladas de residuo de vidrio para ser reincorporado al proceso de producción, por lo que se inicia el reciclaje de vidrio templado. *Culletes* un vocablo francés utilizado en Guatemala para designar el residuo de vidrio templado.

En 1970 se inició la compra de vidrio procedente del vertedero municipal de la zona 3, como inicio de la recuperación del vidrio de origen domiciliario. De igual forma se empezó en 1980 a comprar vidrio procedente de El Salvador y Honduras. A mediados de 1990 se iniciaron programas de recolección de vidrio t hacía todo el país, siempre con el propósito de reciclarlo.

2.9.1. Estimados de generación de vidrio

Los volúmenes actuales de producción de vidrio en Guatemala son de 4 250 toneladas por mes. Todo lo que se produce se envasa en tres colores diferentes: 65 % transparente, 15 % marrón y 20 % verde, según estadísticas del Departamento de Reciclaje de vidriera guatemalteca, S.A. (VIGUA).

2.9.2. Volumen estimado de vidrio en los residuos domiciliarios

A continuación, se presenta un estimado de la generación de residuos domiciliarios. Se entiende como residuos domiciliarios aquellos generados en las casas de los habitantes de un sector. En esta estimación no se incluyen los residuos generados en la industria ni en el sector comercial.

Tabla III. Composición de residuos sólidos domiciliarios (vidrio)

Estrato Socioeconómico tipo de residuo	ALTO	MEDIO ALTO	MEDIO BAJO	BAJO
Vidrio	2,5 %	1,7 %	1,3 %	1,0 %

Fuente: Cepis. OMS.

Según la información del Banguat, 31 275 toneladas corresponden a residuos y desperdicio de vidrio recolectados anualmente. En cuanto a la generación de residuos a nivel domiciliario, para el rubro de vidrio, se estima un porcentaje de la siguiente manera:

Tabla IV. **Generación de vidrio a nivel domiciliario**

Según el área	Porcentaje (%)	Referencia
Nivel Nacional	1-2,5	Organización Panamericana de la Salud (OPS)
Nivel Metropolitano	3,2	Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA)
Nivel Departamental	4	ECONSULT.

Fuente: Banguat.

Esto da un total de generación de 15231 a 38077 toneladas anuales nivel nacional, 22192 toneladas anuales a nivel departamental y de 18327 toneladas anuales en el área metropolitana.

2.10. Tratamiento, infraestructura y capacidad actual en el país

Guatemala es el país centroamericano que está a la vanguardia en el reciclaje del vidrio, con un 55 % del total producido. Pues en algunos casos se han logrado volúmenes de reciclado de 35 000 toneladas métricas anual aproximadamente, según estadísticas del Departamento de Reciclaje de vidriera guatemalteca, S.A. (VIGUA).

En la ciudad de Guatemala se acopia para el área de Guatemala, El Salvador y San Pedro Sula en donde se recolecta aproximadamente 2 000 toneladas por mes, de las cuales 1 600 toneladas se recolectan solo en Guatemala. A continuación, se presenta un estimado del total de residuos recuperados en porcentaje.

Tabla V. **Total de residuos recuperados (vidrio)**

Según el área	Porcentaje (%)
Empresas Botelladoras	65
Vertederos	25
Vidrierías	5
ONG´	5

Fuente: Departamento de Reciclaje de vidriera Guatemalteca, S.A. (VIGUA).

Este volumen de recuperación es considerable, tomando en cuenta que el contenido de vidrio en los residuos sólidos es sumamente bajo, es decir no más de 3,5 % del total del volumen de la basura que se genera domésticamente. Sumando esto al desconocimiento en general de la población de su enorme potencial como materia prima.

El mayor porcentaje de vidrio para reciclar es proveniente de envases de todos los colores, pero también se recibe vidrio templado plano para ventanería de color transparente, aunque no de colores. Esto porque contiene contaminantes que interfieren con el proceso, los cuales producen vidrio templado de baja calidad con burbujas, vetas y rayones.

2.11. Ciclo de vida del residuo a nivel nacional (diagrama)

El desperdicio (pedazos de vasija o vaso que se rompe) de vidrio, proviene fundamentalmente de dos fuentes: una interna y otra externa. En cada fábrica de vidrio se produce internamente cierta cantidad de desperdicio, que es reutilizado en la propia fábrica sin otro procesamiento adicional, debido a que su calidad y composición es conocida. El desperdicio generado externamente tiene

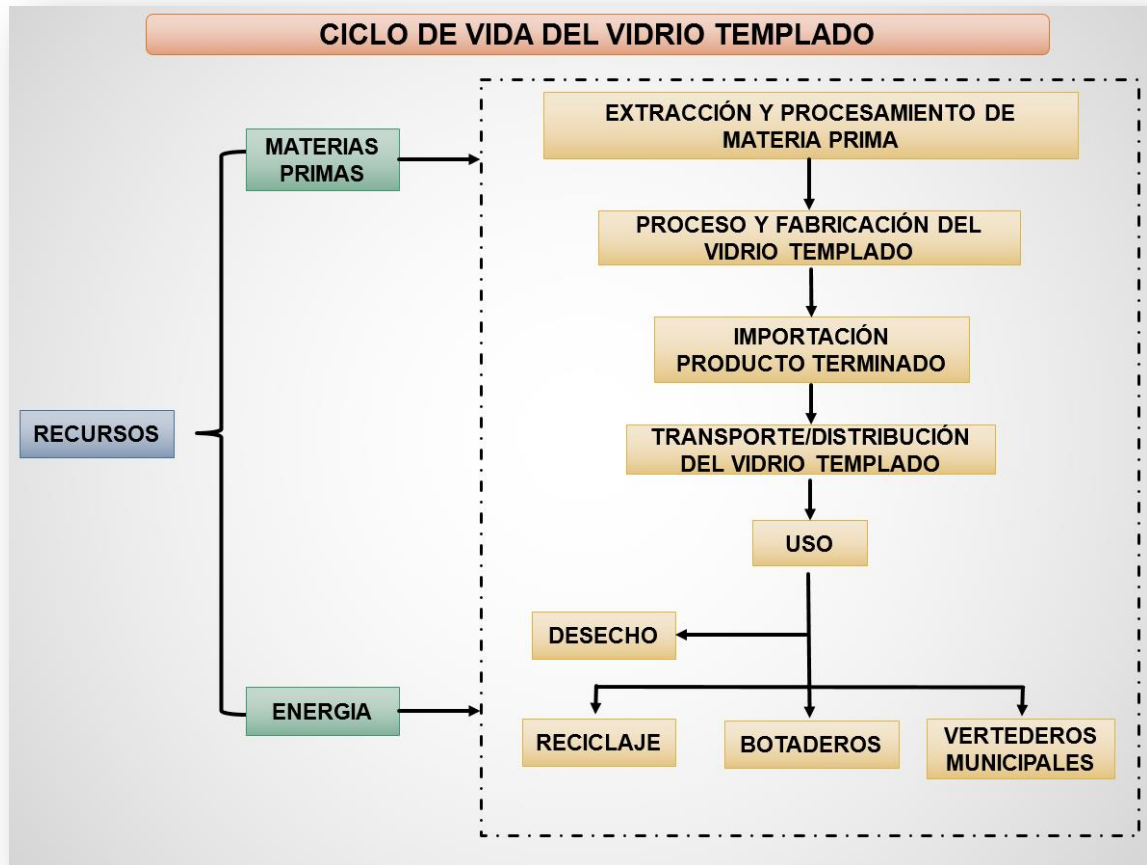
diversas procedencias. La principal fuente de desperdicio de vidrio externo son los propios usuarios y procesadores de todo tipo de productos de este material.

En el caso de los residuos domiciliarios, la situación es muy compleja, no siempre es posible conocer la procedencia y composición química de cada vidrio encontrado.

En este caso, la mejor solución es separar y clasificarlo por producto, determinando luego su destino correcto. Algunos procesos de fabricación de vidrio pueden usar solo el sobrante de vidrio generado internamente (por ejemplo, el vidrio plano). En otras industrias de vidrio es posible aprovechar una cierta cantidad del sobrante generado externamente (por ejemplo, envases de vidrio).

- El mercado del vidrio se disgrega en tres vertientes sustancialmente diferentes:
 - Vidrio recuperado para materia prima de la empresa productora de envases de vidrio.
 - Botellas y envases con posibilidad de reutilización.
 - Vidrio templado.

Figura 2. Diagrama de vida del vidrio templado



Fuente: elaboración propia.

2.11.1. Cal hidratada⁸

Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos.

La cal hidratada es conocida también como hidróxido de calcio, hidrato de cal, cal apagada, cal muerta, cal aérea apagada, cal de construcción, cal química, cal fina, cal de albañilería, flor de cal o dihidróxido de calcio. El óxido de calcio debe recibir una cantidad estrictamente necesaria de agua, obteniéndose un hidróxido como polvo seco, que se muele finamente.

2.11.1.1. Definición

Es una cal hidratada en polvo elaborada de calizas de alto contenido de carbonato de calcio, calcinadas e hidratadas. Es un hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ con un bajo contenido de dióxido de magnesio. Esta cal aérea adquiere su resistencia al reaccionar con el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra en el aire, produciéndose nuevamente el carbonato de calcio.

2.11.1.2. Uso

Su uso principal es en albañilería o mampostería, se utiliza en las mezclas para recubrimientos como repello, cernidos y otras texturas, para mezclas de levantado de paredes de block, concreto y pómez, para mezclas de pega de fachaletas y para la elaboración de mezclón.

⁸ Cal hidratada. <http://horcalsa.com/cal-hidratada/>. Consulta: 7 de noviembre de 2017.

La investigación se orientó a utilizar la cal hidratada como componente importante dentro de una mezcla asfáltica en caliente sin alterar la composición del cemento asfáltico. Con adición de cal hidratada aumenta la resistencia a la deformación.

2.11.1.3. Presentación

Disponible en bolsa de 20kg (44 lbs), 25 kg (lbs) y granel.

2.11.1.4. Beneficios

Su mayor pureza asegura un menor consumo de cal, reducción del problema de incrustaciones o coloración. Reduce la formación de sarro o incrustaciones en tuberías y equipos; mayor área superficial que mejora la reactividad y reduce el consumo de cal.

2.11.1.5. Pureza

Arriba del 90 % expresada como hidróxido de calcio Ca(OH)_2 . La mayor cantidad de óxido de calcio disponible o reactivo mayor que 65 % de CaO disponible.

3. DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

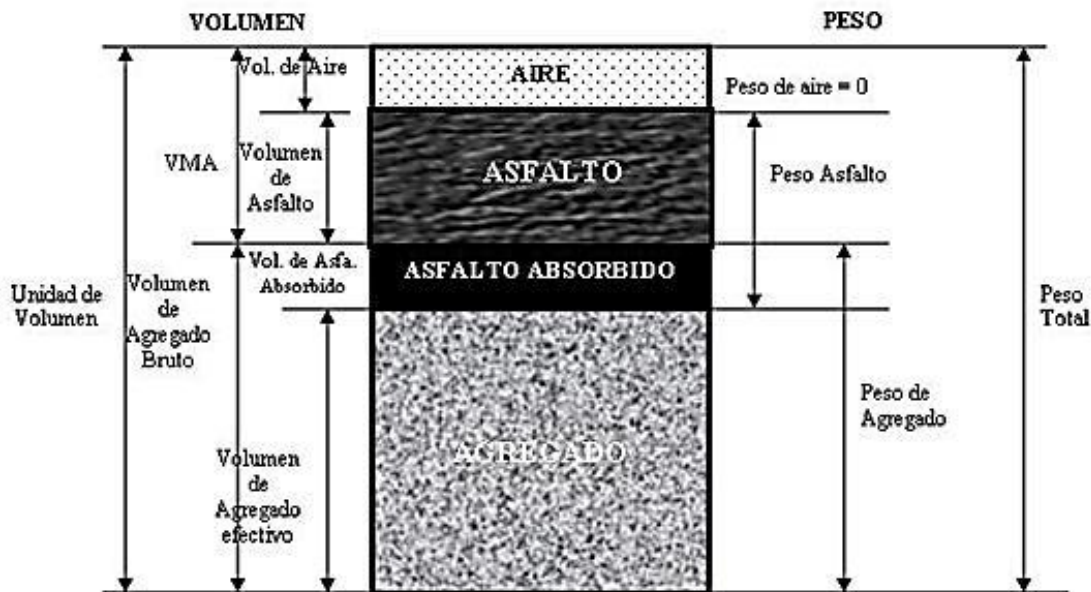
3.1. Características de una mezcla asfáltica

“Las mezclas asfálticas, también reciben el nombre de aglomerados, están formadas por una combinación de agregados pétreos y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos quedan cubiertos por una película continua del ligante. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles, se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (William J. Kraemer. *Fundamentos de resintencia de un pavimento*. 2004. p. 45). Las mezclas asfálticas se utilizan en la construcción de carreteras, aeropuertos, pavimentos industriales, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesado intenso. Las mezclas asfálticas están constituidas aproximadamente por un 90 % de agregados pétreos grueso y fino, un 5 % de polvo mineral (*filler*) y otro 5 % de ligante asfáltico. Los componentes mencionados anteriormente son de gran importancia para el correcto funcionamiento del pavimento y la falta de calidad en alguno de ellos afecta el conjunto. El ligante asfáltico y el polvo mineral son los dos elementos que más influyen tanto en la calidad de la mezcla asfáltica como en su costo total.”⁹

La mezcla asfáltica en caliente preparada en laboratorio debe ser analizada para determinar el desempeño posible en la estructura del pavimento. Determinando así, características principales y la influencia que estas tienen en el comportamiento de la mezcla.

⁹ *Mezclas Asfálticas*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>. Consulta: 9 de noviembre de 2017.

Figura 3. Representación de la composición típica de una mezcla asfáltica



Fuente: *Strategic Highway Research Program SHRP A-369*, 1994. p.56

3.1.1. Contenido de bitumen ¹⁰

El contenido de bitumen de una mezcla en particular es establecido usando los criterios descritos por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de bitumen de una mezcla depende en gran medida de su granulometría y la capacidad de absorción del agregado. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo de bitumen.

Si en una granulometría el porcentaje de finos es considerablemente alto, el área superficial total será mayor, requiriendo así mayor cantidad de bitumen para cubrir todas las partículas.

¹⁰ *Diseño de mezclas asfálticas*. http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf. Consulta: 10 de noviembre de 2017

Las mezclas gruesas exigen menos bitumen debido a que el área superficial total es menor. Si a la mezcla se le agrega pequeños incrementos de filler (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0,075 mm existe una tendencia a absorber la mayor parte del contenido de bitumen resultando una mezcla inestable y seca. Caso contrario al efectuar pequeñas disminuciones de filler, nos da como resultado una mezcla muy rica (húmeda).

La capacidad de absorción del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de bitumen. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente bitumen a la mezcla para permitir la absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de bitumen. El contenido total de asfalto es la cantidad de bitumen que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de bitumen no absorbido por el agregado; es la cantidad de bitumen que forma una película ligante efectiva sobre las superficies de los agregados. El contenido efectivo de bitumen se obtiene al restar la cantidad absorbida de bitumen del contenido total de bitumen.

Es así que los incrementos o disminuciones de filler causan cambios en las propiedades de la mezcla, llegando a variar de seca a húmeda. La capacidad de absorción del agregado en una mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de bitumen. Técnicamente se habla de dos tipos de bitumen al referirse al bitumen absorbido y el no absorbido: contenido total de bitumen y contenido efectivo de bitumen. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de bitumen de una mezcla.

3.1.2. Resistencia a la deformación

Es la capacidad de una mezcla asfáltica de resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas impuestas por el tránsito. La carpeta asfáltica debe de ser capaz de mantener su forma y textura ante las secuencias de carga que a diario le son impuestas. La fricción interna depende de la textura superficial, graduación del agregado, forma de la partícula, densidad de la mezcla, y, del contenido y tipo de asfalto. La estabilidad es función de la fricción y la resistencia inter-bloqueada del agregado en la mezcla. Cuando sobrepasamos el nivel óptimo de asfalto la película es demasiado gruesa y esto genera que la cohesión decrezca, resultando en pérdida de fricción entre las partículas que componen la mezcla asfáltica. Es importante que las partículas que componen el agregado sean angulares y ásperas en su textura superficial, esto dará una alta estabilidad a la mezcla.

Tabla VI. **Causas y efectos de la inestabilidad en el pavimento**

Causas	Efectos
Exceso de bitumen en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamiento y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación
Agregado redondeado sin, o con pocas superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 61.

3.1.3. Resistencia a la fatiga

Es la capacidad de un pavimento asfáltico para resistir la flexión repetida causada por las cargas de tránsito. Si el porcentaje de vacíos en la mezcla asfáltica aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento disminuye. Por tal razón, las mezclas asfálticas de graduación densa presentan mayor resistencia a la fatiga que las mezclas asfálticas de graduaciones abiertas. El envejecimiento y endurecimiento del asfalto en la carpeta de rodadura da como resultado menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, influyen determinadamente en la vida útil de una carpeta de rodadura asfáltica. Si la carpeta asfáltica presenta buena resistencia a la fatiga y la subbase está mal compactada, se verán claramente los asentamientos y la resistencia a la fatiga disminuye considerablemente. Caso contrario si la subbase está bien compactada y la carpeta asfáltica presenta mala resistencia a la fatiga la carpeta se dañará. Por lo anterior, el pavimento debe trabajar en conjunto para que pueda resistir la flexión causada por el tránsito.

Tabla VII. **Causas y efectos de una mala resistencia a la fatiga**

Causas	Efectos
Bajo contenido de bitumen	Agrietamiento por fatiga
Vacíos altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 65.

3.1.4. Resistencia al agrietamiento por temperatura

Es la capacidad de la carpeta asfáltica para acomodarse ligeramente, sin sufrir agrietamiento, soportando los movimientos graduales y asentamientos de la base y subbase. Los asentamientos en el pavimento pueden ocurrir debido a que falle cualquiera de sus componentes, provocando daños visibles en la carpeta de rodadura. De hecho, todas las estructuras tienden a tener asentamientos diferenciales. La flexibilidad de las mezclas asfálticas es incrementada agregando mayor contenido de asfalto, hasta llegar al contenido óptimo; a partir de este, si se aumenta en exceso el contenido de asfalto la carpeta tiende a ser extremadamente flexible y provoca entonces una mezcla con estabilidad baja. Algunas veces los requerimientos de flexibilidad entran en conflicto con los requisitos de estabilidad, de tal manera que se debe buscar el equilibrio de los mismos. Una mezcla de granulometría abierta con alto contenido de asfalto es, generalmente, más flexible que una mezcla densamente graduada de bajo contenido de asfalto.

3.1.5. Resistencia al deslizamiento

Es la habilidad de una carpeta asfáltica, particularmente cuando está mojada, de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos. Esto implica que el neumático debe mantenerse en contacto con las partículas del agregado y no sobre una película de agua en la superficie del pavimento, conocido como hidroplaneo. Una buena resistencia al deslizamiento lo contribuyen agregados con textura áspera y contenidos adecuados de asfalto. Los contenidos altos de asfalto producen mezclas inestables las cuales tienden a deformarse y exudar, generando así, mayor deslizamiento.

Una superficie áspera y rugosa de pavimento tendrá mayor resistencia al deslizamiento que una superficie lisa. La mejor resistencia al deslizamiento se obtiene con un agregado de textura áspera, en una mezcla de graduación abierta y con tamaño máximo de 9,5 mm (3/8”) a 12,5 mm (1/2”).

Tabla VIII. **Causas y efectos a la poca resistencia al deslizamiento**

Causas	Efectos en la carpeta
Exceso de bitumen	Exudación, poca resistencia al deslizamiento
Agregado mal graduado o con mala textura	Pavimento liso, posibilidad de hidroplaneo
Agregado pulido en la mezcla	Poca resistencia al deslizamiento

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 65.

3.1.6. Resistencia a la humedad

Es la resistencia de una carpeta asfáltica al paso del aire y agua hacia su interior o a través de él. El contenido de vacíos puede ser una indicación a la susceptibilidad de una mezcla compactada al paso del agua y el aire.

Tabla IX. **Causas y efectos de mezcla demasiado permeable**

Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de bitumen	Las películas delgadas de asfalto causarán, tempranamente, un envejecimiento y una desintegración de la mezcla
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

Continuación de la tabla IX.

Compactación inadecuada	Resultará en vacíos altos en la carpeta asfáltica, lo cual conducirá a infiltración de agua y baja estabilidad.
-------------------------	---

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 63.

3.1.7. Durabilidad

Es la propiedad de una mezcla asfáltica para resistir los efectos perjudiciales causados por el agua, aire, temperatura y las cargas debidas al tráfico. Estos efectos perjudiciales provocan desintegración del agregado, cambio en las propiedades del asfalto (polimerización y oxidación), envejecimiento, segregación, entre otros.

Puede mejorarse la durabilidad de una mezcla asfáltica de tres maneras:

- Utilizando un contenido óptimo de asfalto: se aumenta la durabilidad de la mezcla ya que las partículas del agregado están cubiertas por una película gruesa de asfalto. Esto evita el envejecimiento y el endurecimiento del asfalto, reteniendo por más tiempo las características originales, tanto del asfalto como de los agregados.
- Utilizando una graduación densa: esto proporciona un contacto más cercano entre las partículas de agregado, mejorando así la impermeabilidad de la mezcla.

- Diseñar y compactando la mezcla para obtener la máxima impermeabilidad: esto se logra mediante la compactación por medios mecánicos utilizando maquinaria y equipo adecuado.

Tabla X. **Causa y efecto de la poca durabilidad**

Causas	Efectos en la carpeta
Bajo contenido de bitumen	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 (hidrofilicos)	Películas de asfalto se desprenden del agregado dejando una carpeta de rodadura desgastada ó desintegrada

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 62.

3.1.8. Trabajabilidad

Es la facilidad con la cual una mezcla asfáltica puede ser colocada y compactada. Las mezclas que poseen buena trabajabilidad son fáciles de colocar y compactar; aquellas con mala trabajabilidad son difíciles de colocar y compactar. Las mezclas gruesas (mezclas que contienen un alto porcentaje de agregado grueso) tienen una tendencia a segregarse durante su manejo, y también pueden ser difíciles de compactar. El asfalto no es la principal causa de los problemas de trabajabilidad, sí tiene algún efecto sobre esta propiedad.

Tabla XI. **Causas y efectos de 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

Fuente: Asphalt Institute, *Principios de Construcción de Mezcla Asfáltica en Caliente*, MS 22, p. 64.

Debido a que la temperatura de la mezcla afecta la viscosidad del asfalto, una temperatura demasiado baja hará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que una temperatura demasiado alta podrá hacer que la mezcla se vuelva tierna. El grado y el porcentaje de asfalto también pueden afectar la trabajabilidad de la mezcla.

3.2. Ensayos a realizar

A continuación, se presentan las metodologías de los ensayos a realizar a una mezcla asfáltica.

3.2.1. Metodología de Marshall

El concepto del método Marshall para diseño de mezclas asfálticas fue formulado por Bruce Marshall, ingeniero de asfaltos del Departamento de

Autopistas del estado de Mississippi. El cuerpo de ingenieros de Estados Unidos, a través de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall y desarrollo un criterio de diseño de mezclas.

El propósito del Método Marshall es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también provee información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente, y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la elaboración de la mezcla. El método original de Marshall, sólo es aplicable a mezclas asfálticas en caliente que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulg) o menor. El método puede ser usado para el diseño en laboratorio, como para el control de campo de mezclas asfálticas en caliente.

El método Marshall usa muestras de ensayo (probetas) de 64 mm (2,5 pulg) de espesor por 102 mm (4 pulg) de diámetro. Una serie de muestras de ensayo, cada una con la misma combinación de agregados, pero con diferentes contenidos de asfalto, es preparada usando un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar la mezcla asfáltica. Los dos aspectos principales del método de diseño son: análisis de densidad y vacíos y el ensayo de estabilidad y flujo de los especímenes compactados. La selección de una curva granulométrica para el diseño de una mezcla asfáltica cerrada o densa, está en función de dos parámetros: el tamaño máximo nominal del agregado y el de las líneas de control (superior e inferior). Las líneas de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. La tabla XII presenta los tamaños máximos nominales más utilizados, así como sus líneas de control de acuerdo con la ASTM D 3515.

3.2.2. Gravedad específica bruta (*Bulk*)

El ensayo de gravedad específica *bulk* de mezclas asfálticas compactadas utilizando especímenes saturados superficialmente secos puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado. Este ensayo se desarrolla de acuerdo con la norma AASHTO T 166-05, para la gravedad específica bulk de mezclas asfálticas compactadas, usando especímenes cubiertos con parafina la norma AASHTO T 275 es aplicada. Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizarán pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2 %, se utiliza la norma AASHTO T 166-05, en caso contrario, se recurre a la norma AASHTO T 275.

3.2.3. Gravedad específica teórica máxima

Se determina la gravedad específica teórica máxima G_{mm} de acuerdo a la norma AASHTO T 209-05, de la mezcla asfáltica en su estado suelto, para al menos dos contenidos de asfalto; de preferencia en un rango en donde se estime que podrá encontrarse el contenido óptimo. Una vez hecho lo anterior, se pueden determinar los valores de G_{mm} para los distintos contenidos de asfalto que se utilizan en el diseño, empleando fórmulas de aproximación tal como lo describe el Instituto del Asfalto de Norteamérica en su Manual de Métodos de Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente.

3.2.4. Resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas

Basado en norma AASHTO T 245-97(2004). El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla. La fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

Sumergir el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($140\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$) de 30 a 40 minutos antes de la prueba. Remueva el espécimen de ensayo del baño María y cuidadosamente se secará la superficie. Colocándolo y centrándolo en la mordaza inferior, se procederá a colocarlo en la mordaza superior y se centrará completamente en el aparato de carga. Posteriormente se aplica la carga de prueba al espécimen a una velocidad constante de 50,8 mm/min (2 pulg/min), hasta que ocurra la falla. El punto de falla está definido por la lectura de carga máxima obtenida. El número total de Newtons (lb) requeridos para que se produzca la falla del espécimen deberá registrarse como el valor de estabilidad Marshall.

Mientras que el ensayo de estabilidad está en proceso, si no se utiliza un equipo de registro automático se deberá mantener el medidor de flujo sobre la barra guía y cuando la carga empiece a disminuir habrá que tomar la lectura y registrarla como el valor de flujo final. La diferencia entre el valor de flujo final e inicial expresado en unidades de 0,25 mm (1/100") será el valor del flujo Marshall.

3.2.5. Porcentaje de vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se realiza el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba. Resulta conveniente determinar la gravedad específica teórica máxima (AASHTO T 209) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente aquellos que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado se calculará de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado; el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas; la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso del agregado seco, porcentaje de vacíos (Va); porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA) y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA).

3.2.6. Granulometría del vidrio templado

La granulometría se determina mediante la norma ASTM D422, este ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente, efectuada sobre una muestra de masa (vidrio templado); el análisis de tamizado o granulometría consiste en pasar la muestra por una serie de diferentes tamaños de tamices especificados en el diseño de granulometría a trabajar.

La granulometría del material toma en cuenta el porcentaje (en peso) total de muestra que pasa por cada uno de los tamices, en el cual se reemplazará un porcentaje de material (vidrio templado) en lugar del agregado que en este caso se utilizó un 10 % del tamiz No. 50 y un 5 % del tamiz No.200.La granulometría es determinada al calcular el peso del contenido de cada tamiz, luego se resta el peso del contenido de cada tamiz del peso total de la muestra.

3.2.7. Gravedad específica del vidrio templado

Al igual que un suelo, se debe determinar la gravedad específica del vidrio templado, según la norma ASTM D854 o su equivalente AASHTO T100, y es la relación que tiene la gravedad específica del material y la gravedad específica del agua destilada y sujeta a la presión de una atmósfera. Este ensayo se determina en laboratorio con la ayuda de dos matraces aforados de 500 centímetros cúbicos cada uno y una balanza. El procedimiento empieza llenando un matraz con agua destilada, se pesa el completamente, luego se vacía el matraz y se introduce una cantidad referente del material seco al matraz, se llena de agua y se agita de manera que salga todas las burbujas de aire que puedan afectar en el peso total del matraz, con material en el agua destilada, teniendo el peso del matraz con agua, el peso del matraz con material y agua, y finalmente teniendo el peso del material referente. Estos datos se introducen a la fórmula específica para obtener la gravedad específica, luego se repite el procedimiento con el otro matraz, para que posteriormente se promedie el resultado obtenido.

3.3. Desempeño mecánico de la capa de rodadura para concreto asfáltico ¹¹

Las carpetas de rodadura se enfrentan a muchos factores externos que afectan la vida útil que éstas pueden llegar a tener. Los factores externos que han de considerarse para validar el desempeño de la capa de rodadura para concreto asfáltico son los siguientes:

- Clima
- Carga vehicular

¹¹ *Evaluación del desempeño de la carpeta de rodadura de mezcla asfáltica tibia en comparación con el de la mezcla asfáltica en caliente.* <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6296/1/-Evaluaci%C3%B3n%20del%20desempe%C3%B1o%20de%20la%20carpeta%20de%20rodadura%20de%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20tibia%20en%20comparaci%C3%B3n%20con%20el%20de%20la%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20caliente.pdf>. Consulta: 10 de diciembre de 2017.

- Edad
- Topografía

3.3.1. Influencia del clima en el desempeño de la carpeta de rodadura

Las condiciones climáticas afectan directamente el comportamiento de la estructura del pavimento, debido a esto la carpeta de rodadura eventualmente podría llegar a presentar evaluaciones negativas en su desempeño. Muchos de los materiales que se encuentran en las capas subyacentes, poseen sensibilidad al contacto con el agua, esto podría llegar a alterar las propiedades mecánicas y el comportamiento de los materiales.

La exposición a la radiación solar, también provoca daños severos a la superficie del pavimento, debido a los materiales como el asfalto los cuales son sensibles a los cambios de temperatura, y la capacidad de absorber el calor es mayor, debido a su color y al fenómeno de albedo. La exposición a altas temperaturas también tiene como consecuencia, un envejecimiento y un deterioro en las propiedades elásticas del asfalto.

3.3.2. Influencia en la carga vehicular en el desempeño de la carpeta de rodadura

La carga vehicular es la responsable de los esfuerzos y deformaciones que debe soportar la carpeta de rodadura (excepto aquellos esfuerzos y deformaciones provocados por efectos de la temperatura). En un pavimento flexible la carpeta de rodadura es la responsable de recibir la carga y distribuirla a toda la estructura del pavimento. Esta capa es capaz de deformarse y regresar a su condición original gracias a las propiedades elásticas del asfalto.

Sin embargo, la exposición prolongada y en ciertos casos excesiva de cargas sobre la carpeta de rodadura produce deformaciones permanentes a causa de la fatiga. Estas deformaciones se manifiestan por medio ahuellamientos, grietas longitudinales, transversales y otros tipos de daños.

3.3.3. Influencia de la edad en el comportamiento de la carpeta de rodadura

Un factor a considerar es la edad de la carpeta de rodadura, esta se medirá a partir del momento en que fue abierta al tránsito.

El paso del tiempo no es lo que afecta a la carpeta de rodadura, sino lo que sucede durante ese tiempo, pues el daño que pueda presentar una carpeta debido a la acción del clima y la carga vehicular durante 5 años, será mucho menor que el que pueda presentar esta misma para un período de 10 años, bajo las mismas condiciones. La edad tiene entonces una relación directamente proporcional a los daños que presenta la carpeta de rodadura.

Regularmente las carreteras se diseñan para una vida útil de 20 años aproximadamente. Sin embargo, es necesario dar un mantenimiento a las mismas para que puedan cumplir con este tiempo de servicio. Las instituciones gubernamentales responsables del mantenimiento de las vías, proporcionan dos tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento correctivo

3.3.4. Influencia de la topografía en el desempeño de la carpeta de rodadura

La posición en la que un tramo de pavimento recibe la carga vehicular determina los esfuerzos que surgen internamente en la estructura del pavimento. Si la estructura del pavimento recibe la carga vehicular en una dirección perpendicular a su eje longitudinal, los esfuerzos que surgirían internamente en la carpeta de rodadura podrían ser representados por esfuerzos de flexión; mientras que, si la carga vehicular es recibida con algún grado de inclinación con respecto al eje longitudinal de la carretera, los esfuerzos pueden representarse por un esfuerzo de flexo compresión.

La carpeta de rodadura por ser la capa más externa y la más rígida de la estructura del pavimento, es la encargada de recibir las cargas y transmitir las a las otras capas del pavimento. Por ser una capa continua en el caso de los pavimentos flexibles, es muy complejo establecer con precisión la distribución de esfuerzos dentro de ella, sin embargo, resulta claro entender, que dependiendo de la pendiente que tenga la capa de rodadura así será el comportamiento estructural de ella y por lo tanto los daños que se manifiesten debido a deformaciones permanentes.

Se espera que la carpeta de rodadura absorba la mayor cantidad de los esfuerzos que la carga vehicular le induce a la estructura del pavimento, por ello puede decirse que la carpeta de rodadura tiene la función de proteger a las capas subyacentes. Es por esto por lo que la carpeta de rodadura crece en espesor a medida que crece la carga vehicular que ha de soportar. Los procedimientos de diseño se enfocan en establecer el espesor de esta capa en base a la carga vehicular a la que será sometido el pavimento durante un periodo establecido de tiempo.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Obtención del vidrio templado

La obtención de este material se llevó a cabo por medio de la recolección de planchas de vidrio templado de vehículos en la empresa “PACOL S.A.” ubicada en la zona 8 de la ciudad capital. Esta empresa nos proporcionó todo el vidrio templado que ellos como empresa desechan de todos los vehículos que llegan a cambiar el vidrio que se encuentran quebrados o en mal estado.

Figura 4. **Planchas de vidrio templado**



Fuente: empresa PACOL, S.A.

4.2. Caracterización de los agregados

Para obtener partículas de vidrio templado en un tamaño deseado para utilizarlo en una mezcla asfáltica en caliente se hizo de manera manual. El proceso consistió en colocar las planchas en el suelo, luego con un mazo y otros objetos pesados se fueron golpeando hasta llegar a tener partículas con tamaño no mayor a 3/8" (9,5 mm).

Luego de haber obtenido los agregados, se procedió a evaluar las características físicas del agregado a utilizar en la mezcla asfáltica de acuerdo con las normas establecidas

Las propiedades de los materiales representan un factor crítico en el diseño de las mezclas asfálticas, ya que una mala selección de materiales pétreos puede ser la diferencia entre el éxito y el fracaso de un proyecto.

En resumen, las propiedades más importantes de los agregados pétreos son las siguientes:

- Angularidad (grueso, fino): esta prueba tiene como objetivo asegurar un alto grado de fricción interna entre los agregados y por lo tanto evitar la formación de marcas en el asfalto debido a las ruedas de un vehículo.
- Forma de la partícula (alargada o lajeada): esta prueba tiene como objetivo evitar el uso de agregados que pueden presentar problemas de fractura durante el manejo, construcción y vida útil. Las fallas que trata de prevenir son: deformaciones permanentes y grietas por fatiga.

- Equivalente de arena. Limita la cantidad de arcilla en el agregado para asegurar un buen contacto agregado y asfalto. Con el objetivo de evitar el desgranamiento de las mezclas por pérdida de adherencia.

Algunas propiedades de especial interés en la pavimentación son la granulometría y el tamaño de la partícula, su dureza, su forma, su textura superficial, su capacidad de absorción y su afinidad con el asfalto.

Figura 5. **Trituración de planchas de vidrio templado**



Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Agregado (vidrio templado) y árido

El vidrio templado, fue obtenido de la trituración de planchas de vidrio templados de vehículos en la empresa “PACOL S.A.” mediante la utilización manual con un mazo y tamices. El material árido fue procesado en la planta de AGRECA ubicada en Palín, Escuintla.

Figura 6. **Vidrio templado obtenido de la trituración**



Fuente: elaboración propia.

4.2.1.1. Granulometría

Este método cubre la determinación de la distribución de tamaño de partículas de un agregado fino y grueso.

Este método es usado principalmente para determinar la granulometría de los materiales pétreos. Los resultados obtenidos de este método son usados para determinar el cumplimiento de la distribución de las partículas contra los requerimientos de la especificación particular al cual se designe su uso y proveer la información necesaria de control en la producción de varios agregados o mezclas.

4.2.1.1.1. Agregado Fino

Es aquel que pasa el tamiz 3/8" (9,5 mm) y casi por completo por el tamiz No. 4 (4,75 mm), y retenido de modo predominante por el tamiz No. 200

(0,075 mm) y proviene de la desintegración de las rocas. Debe de cumplir con los requisitos establecidos en la Norma ASTM D 1073. Este material fue procesado en la planta de AGRECA ubicada en Palín, Escuintla y es resultado de la trituración de una piedra de basalto.

4.2.1.1.2. Agregado Grueso

Es aquel que es retenido de modo preponderante por el tamiz No. 4 (4,75 mm) y debe cumplir con los requisitos establecidos en la Norma ASTM D 692. Este material fue procesado en la planta de AGRECA ubicada en Palín, Escuintla.

Figura 7. **Tara con muestra de agregados gruesos y finos**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

4.3. Procedimiento del Método Marshall

A continuación, se presentan las metodologías y procedimientos de los ensayos que se deben realizar a la mezcla asfáltica en caliente.

4.3.1. Descripción de la metodología del diseño de mezcla

El método provee información sobre propiedades que debe de poseer la mezcla asfáltica, establece valores de densidades y contenidos óptimos de vacíos, que deben ser cumplidos durante la realización de la mezcla. El método Marshall se basa en un experimento de laboratorio, dirigido al diseño de una mezcla asfáltica adecuada. Esto se obtiene a través del análisis de la estabilidad, fluencia, densidad y vacíos en la mezcla. El análisis de la relación vacíos y densidad y la prueba de estabilidad y flujo de las muestras compactadas, son los datos más importantes del diseño por medio de este método.

4.3.1.1. Metodología

- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.
- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.
- AASHTO T 245: resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando el aparato Marshall, por sus siglas en inglés, *resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

La mezcla de material pétreo y material bituminoso, debe llenar los requisitos del método de diseño establecido en las *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*, de la Dirección General de Caminos.

Tabla XII. **Requisitos para mezcla de concreto asfáltico**

MÉTODO DE DISEÑO ⁽¹⁾	VALORES LÍMITES	
	Mínimo	Máximo
1. <u>MARSHALL</u> (AASHTO T245)		
• Temperatura de compactación (generalmente comprendida entre 130 y 140 °C) de pastilla para producir una viscosidad de	0,25 Pa-s o 250 cS	0,31 Pa-s o 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.)	8	16
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	8	14
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	120	275
• Relación estabilidad fluencia (lb/0,01 pulg)		
• Porcentaje de vacíos de la mezcla compactada ⁽³⁾	3	5
• Porcentaje de vacíos en agregado mineral (VAM)	Ver tabla XI	
• Porcentaje de vacíos rellenos con asfalto		
• Tránsito < 10 ⁶ ESAL	65	78
• Tránsito > 10 ⁶ ESAL	65	75
• Relación finos bitumen ⁽⁴⁾		
• Sensibilidad a la humedad AASHTO T283 Resistencia retenida	0,6	1,6
• Partículas recubiertas con bitumen, para definir tiempo de mezclado AASHTO T195	80 %	
	95 %	

(1) El porcentaje de vacíos con aire se basa en AASHTO T 166, AASHTO T 209 y AASHTO T269.

(2) Cuando se establezca en las Disposiciones Especiales, los especímenes podrán ser preparados usando el compactador giratorio aplicando las mismas especificaciones de compactación indicadas más adelante para mezclas Superpave.

(3) Este valor deberá calcularse en función de la gravedad específica máxima de la mezcla compactada determinada directamente conforme el ensayo Rice-AASHTO T 209.

Continuación de la tabla XII.

(4) La razón polvo-asfalto se define como el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75 micrómetros dividido por el contenido efectivo de asfalto calculado por masa de mezcla.

Fuente: *Dirección General de Caminos. Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* p. 401-7.

Tabla XIII. Porcentaje mínimo de 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.

Fuente: *Dirección General de Caminos. Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes.* p. 401-8.

4.3.1.2. Procedimiento

Una mezcla asfáltica se puede presentar según su tamaño máximo, esta parte de la Norma ASTM D 3515, en donde se presentan los valores máximos y mínimos, de donde parte nuestra curva granulométrica de los agregados a utilizar en la mezcla. Para diseñar una mezcla, se define como primer paso, cuál será el tamaño máximo de agregado que utilizaremos. Ya definido el

tamaño de agregado, nos basamos en la tabla XII para conocer los valores de los porcentajes en masa que pasa la serie de tamices utilizados.

Posteriormente, el diseñador elige los valores de los porcentajes que pasa para cada tamiz, construyendo así la curva granulométrica, quedando definido así el diseño de mezcla asfáltica.

Tabla XIV. **Graduación de agregados para pavimentos de concreto asfáltico (ASTM D 3515)**

Tamaño del Tamiz (mm)	Porcentaje en Masa que Pasa el Tamiz designado (AASHTO T 27 y T11)					
	Graduación Designada y Tamaño Máximo Nominal ⁽¹⁾					
	A (50,8 mm)	B (38,1 mm)	C (25,4 mm)	D (19 mm)	E (12,5 mm)	F (9,5 mm)
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"
63,00	100					
50,00	90-100	100				
38,10	-	90-100	100			
25,00	60-80	-	90-100	100		
19,00	-	56-80	-	90-100	100	
12,50	35-65	-	56-80	-	90-100	100
9,50	-	-	-	56-80	-	90-100
4,75	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36	10-36	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0,30	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,075	0-5	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10

Continuación de la tabla XIV.

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

Fuente: *Dirección General de Caminos. Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.* p. 401-1.

Nota: Para el estudio del presente trabajo, se ha elegido trabajar con una mezcla asfáltica tipo E, siendo el agregado máximo de 1/2”.

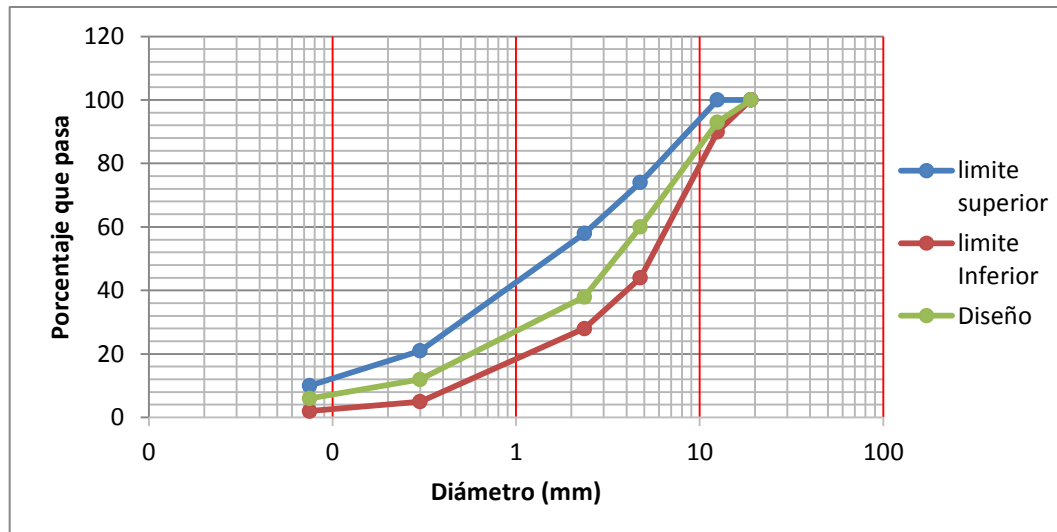
En la tabla XV se presentan los valores propuestos de porcentaje en masa que pasa cada tamiz, dichos valores representan el diseño de mezcla asfáltica con lo cual se llevarán a cabo los diferentes estudios de este trabajo. Cada mezcla asfáltica debe de contener un peso total de 1 100 g. de agregados pétreos.

Tabla XV. **Diseño propuesto de mezcla asfáltica**

Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje de agregado grueso que pasa el tamiz	Porcentaje de agregado fino que pasa el tamiz	Diseño propuesto	Porcentaje de masa retenida en el tamiz	Cantidad en gramos del peso para la mezcla
19,00	100	100	100	0	0
12,50	90	100	93	7	77
4,75	44	74	60	33	363
2,36	28	58	38	22	242
0,30	5	21	12	26	286
0,075	2	10	6	6	66
Fondo				6	66
total					1 100

Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Curva granulométrica del diseño de mezcla asfáltica tradicional**



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

Nota: para el diseño de mezcla modificada, se utilizó vidrio templado en una cantidad del 10 % del tamiz No. 50 y cal hidratada, en una cantidad del 5 % del tamiz No. 200.

4.3.2. Descripción de la metodología para elaboración de probetas de mezclas asfálticas

A continuación se presenta la metodología y el procedimiento para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica.

4.3.2.1. Metodología

La norma a utilizar para la elaboración de las probetas de mezcla asfáltica es la siguiente:

- INV E748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall.

Equipo a utilizar:

- Horno.
- Termómetros adecuados para medir la temperatura del asfalto, los agregados y la mezcla.
- Balanza para pesar material y probetas compactadas.
- Tamices.
- Recipiente para mezclar.
- Cucharones o espátulas.
- Molde cilíndrico con collar de extensión y placa de base plana para moldear probetas.
- Martillo de compactación de operación manual, consiste en un 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 $457,2 \text{ mm} \pm 1,5 \text{ mm}$.
- Pedestal de compactación, 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.
- 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.

Figura 9. **Equipo utilizado para calentar agregados**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 10. **Equipo utilizado para calentar mezcla asfáltica**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 11. **Pedestal de compactación y termómetro para medición de temperatura**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 12. **Equipo de medición de material para mezcla asfáltica**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

4.3.2.2. Procedimiento

Para la elaboración de probetas de mezclas asfálticas, se muestra a continuación los pasos:

- Para una graduación de agregado previamente establecida, preparar una serie de probetas con diferentes contenidos de asfalto, desde un 4 hasta un 6 % (con incrementos de 0,5 % en masa entre ellos), del peso total de la mezcla de agregados. Se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Por lo tanto, se necesita realizar, por lo menos quince probetas por cada diseño de mezcla. Para cada probeta se utilizan 1 100 g de mezcla de agregados, incluyendo el relleno mineral.
- Secar los agregados y separar por tamizado en fracciones de diferentes tamaños.
- Calentar el cemento asfáltico a una temperatura correspondiente para producir una viscosidad cinemática entre 0,15 y 0,19 Pa-s (150 y 190 cS).
- En bandejas taradas, pesar las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas, de acuerdo con el diseño de mezcla propuesto para la fabricación de una probeta. La suma de los pesos acumulados de los agregados debe de ser igual a 1 100 g.
- Calentar los agregados hasta llegar a una temperatura aproximada de 110 °C. Con la ayuda de un recipiente de mezclado y una espátula, mezclar en seco durante un tiempo adecuado que permita obtener una

buena combinación de los agregados, sin que se presente una pérdida de temperatura en la mezcla.

- Verter la cantidad requerida de cemento asfáltico en la mezcla de agregados.
- Mezclar los agregados con el cemento asfáltico lo más rápidamente posible hasta obtener una mezcla completa y homogénea. Esta mezcla se debe realizar en una placa de calentamiento hasta que alcance una temperatura de 140 °C.
- Simultáneamente, con la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar y placa de base, se calientan en un baño de agua a temperatura de 60 °C.
- Secar y armar el conjunto de moldeo de las probetas, aplicándole previamente aceite para desencofrar.
- Verter la mezcla en el molde y apisonar con una espátula 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Esto se realiza para lograr un mejor acomodo de las partículas de la mezcla en el molde.
- Compactar la mezcla aplicando 75 golpes, por medio del martillo de compactación. La temperatura de la mezcla inmediatamente, antes de la compactación, deberá ser aproximadamente de 140 °C.
- Se procede a retirar el collar, se da vuelta al molde y se vuelve a montar este en el pedestal y se aplica el mismo número de golpes a la cara invertida de la probeta.

- Después de la compactación, se retira el collar y los moldes. Se deja enfriar la muestra al aire dentro del molde. 24 horas después de la compactación se desencofra.

4.3.3. Descripción de la metodología para obtener gravedad específica de *Bulk*

A continuación, se presenta la metodología y el procedimiento para la determinación de la gravedad específica *bulk*.

4.3.3.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 733: gravedad específica *bulk* y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes, empleando especímenes saturados y superficialmente secos.
- ASTM D 2726: gravedad específica *bulk* y densidad de mezclas bituminosas compactadas no absorbentes, por sus siglas en inglés, *bulk specific gravity and density of non-absorptive compacted bituminous mixtures*.
- AASHTO T 166: gravedad específica *bulk* de mezclas bituminosas compactadas de superficie seco saturadas, por sus siglas en inglés, *specific gravity of compacted bituminous mixtures using saturated surface-dry specimens*.

Equipo a utilizar:

- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas. Deberá estar provista de un dispositivo de suspensión adecuado, que permita pesar el espécimen dentro del agua suspendido bajo el centro del platillo de la balanza.
- Baño con agua para la inmersión del espécimen. Este deberá estar provisto de un rebosadero para mantener el agua a nivel constante.

Figura 13. **Balanza provista de dispositivo de suspensión**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 14. **Pileta de agua para suspensión de probeta**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

4.3.3.2. Procedimiento

- Determinar la masa del espécimen seco, pesándolo después de que haya permanecido al menos durante 1 hora a temperatura ambiente.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente durante 5 minutos.
- Sacar y secar superficialmente la muestra para posteriormente pesarla y obtener el peso saturado.
- Sumergir la muestra en un baño de agua a temperatura ambiente, se pesa estando suspendida en el agua.

- Se procede a calcular la gravedad específica de la muestra utilizando la siguiente ecuación:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C}$$

Donde:

G_{mb} = gravedad específica *bulk* de probetas

A= masa seca del espécimen (g)

B= masa seca saturada del espécimen (g)

C= masa del espécimen sumergido (g)

4.3.4. Descripción de la metodología para obtener gravedad específica teórica máxima

A continuación, se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la gravedad específica teórica máxima.

4.3.4.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

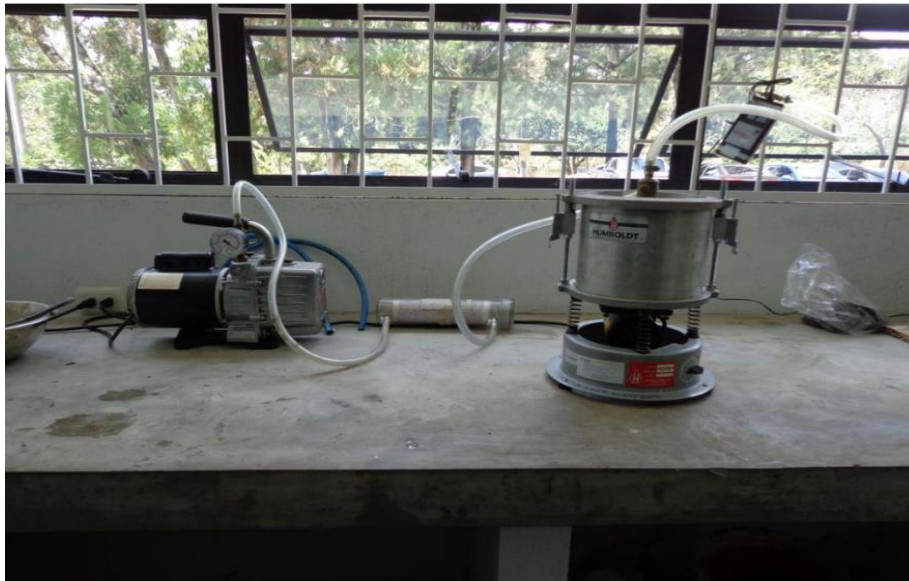
- INV E 735: gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.
- ASTM D 2041: gravedad específica máxima teórica y densidad de las mezclas bituminosas de pavimento, por sus siglas en inglés, *theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*.

- AASHTO T 209: gravedad específica máxima teórica y densidad de las mezclas bituminosas para pavimento, por sus siglas en inglés, *theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*.

El equipo a utilizar es el siguiente:

- Picnómetro de vacíos de metal o plástico con un diámetro de 180 a 260 mm y una altura no menor de 160 mm. Este debe estar equipado con una tapa transparente, asegurada con un empaque de caucho y con una conexión para la aplicación del vacío.
- Balanza con capacidad adecuada y sensibilidad suficiente para que las gravedades específicas de las muestras se puedan calcular al menos con cuatro cifras significativas.
- Bomba de vacío capaz de evacuar el aire del recipiente de vacío hasta una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Trampa de humedad: dispositivo utilizado para reducir la cantidad de vapor de agua que puede entrar en la bomba, colocado entre la bomba de vacío y el picnómetro.
- Manómetro de presión residual: para confirmar que se está aplicando la presión al recipiente, debe ser capaz de medir una presión residual de 4 kPa (30 mm Hg) o menos.
- Válvula de purga: para facilitar el ajuste del vacío que está siendo aplicado al recipiente y la liberación lenta de la presión de vacío.
- Dispositivo de agitación mecánica, que sea capaz de aplicar una agitación suave pero consistente a la muestra.

Figura 15. **Bomba de vacío, picnómetro para vacío y dispositivo de agitación. Dispositivo para atrapar el vapor de agua y manómetro de presión residual**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

4.3.5. Procedimiento

- Una vez que la muestra está seca y se encuentre tibia, desintegrar con las manos logrando separar sus partículas, teniendo cuidado de no fracturarlas. Las partículas de la porción del agregado fino no deben de ser mayores de 6 mm.
- Verter la muestra directamente en el picnómetro previamente tarado. Se pesa el recipiente con la muestra y se designa la masa neta (únicamente la masa de la muestra).

- Agregar agua a temperatura ambiente, suficiente para cubrir la muestra por completo. Se recomienda que el espejo de agua esté a una altura de por lo menos 1" por encima de la mezcla.
- Colocar el picnómetro con la muestra y agua sobre el dispositivo de agitación mecánica y asegurarlo a la superficie de este. Activar la bomba de vacío, poner en marcha la agitación e inmediatamente, por medio de la válvula de presión residual, se busca que la presión de vacío se encuentre dentro de un rango de 25 a 30 psi. La presión de vacío se deberá alcanzar en un tiempo no mayor a 1 minuto y, una vez alcanzado, se continuará el vacío y la agitación durante 15 minutos.
- Una vez transcuridos los 15 minutos, liberar gradualmente la presión de vacío usando la válvula de purga.
- Llenar lentamente el picnómetro con agua, teniendo el cuidado de no introducir aire dentro de la muestra. Secar cualquier humedad presente en el exterior del matraz y de la placa de vidrio templado. Se determina la masa del picnómetro más la placa, más la muestra, más agua.
- Calcular la gravedad específica teórica máxima por medio de la siguiente expresión:

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

Donde:

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

A = masa de la muestra seca (g)

D = masa del picnómetro lleno de agua (g)

E = masa del picnómetro con la muestra y agua (g)

4.3.6. Descripción de la metodología de porcentaje de vacíos

A continuación, se presenta la metodología y el procedimiento para determinar el porcentaje de vacíos.

4.3.6.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 736: porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas.
- ASTM D 3203: método estándar de prueba para porcentaje de vacíos en mezclas bituminosas compactadas densas y abiertas para pavimento, en inglés, *standard test method for percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures*.
- AASHTO T269: porcentaje de vacíos con aire en mezclas compactadas de pavimento bituminoso denso y abierto, en inglés, *percent air voids in compacted dense and open bituminous paving mixtures*.

4.3.6.2. Procedimiento

- Determinar la gravedad específica *bulk* de la mezcla compactada, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Determinar la gravedad específica teórica máxima de la mezcla suelta, por medio del procedimiento descrito anteriormente.
- Calcular el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, por medio de la siguiente expresión:

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

Donde:

V_A = porcentaje de vacíos

G_{mm} = gravedad específica teórica máxima

G_{mb} = gravedad específica bruta

4.3.7. Descripción de la metodología de prueba de estabilidad y flujo Marshall

A continuación, se presenta la metodología y el procedimiento para determinar la estabilidad y el flujo Marshall.

4.3.7.1. Metodología

Las normas a utilizar son las siguientes:

- INV E 748: estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente, empleando el equipo Marshall.
- ASTM D 1559: método de ensayo de resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas, utilizando el aparato Marshall, en inglés, *test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.
- AASHTO T 245: resistencia al flujo plástico de mezclas bituminosas, utilizando el aparato Marshall, en inglés, *resistance to plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus*.

Equipo a utilizar:

- Mordazas de hierro fundido. La mordaza inferior va montada sobre una base plana, provista de dos varillas perpendiculares a ella que sirven de guía para ensamblarla con la mordaza superior.
- Máquina de compresión para la rotura de las probetas. Se emplea una prensa mecánica o hidráulica, capaz de producir una velocidad uniforme de desplazamiento vertical de 50 ± 5 mm/min.
- Anillo dinamométrico, para medir la resistencia de la probeta. Irá acoplado a la prensa y debe ser de 20 kN de capacidad nominal con una sensibilidad mínima de 50 N.

- Deformímetro de lectura final fija, con divisiones de 0,25 mm o de mayor precisión. En el momento del ensayo, el medidor deberá estar apoyado firmemente sobre la mordaza inferior.
- Baño de agua de profundidad suficiente para mantener una lámina de agua mínima de 30 mm sobre la superficie superior de las probetas compactadas. Debe tener un control termostático que le permita mantener la temperatura en cualquier punto del tanque.

Figura 16. **Anillo dinamométrico y deformímetro de lectura fija**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Figura 17. **Recipiente con control termostático**



Fuente: *Laboratorio de Asfaltos*. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC

4.3.7.2. Procedimiento

El ensayo se debe realizar dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas.

- Colocar las probetas en el baño de agua durante 45 minutos, manteniendo una temperatura constante de 60 °C.
- Antes de colocar las probetas, limpiar perfectamente las barras guías y las superficies interiores de las mordazas de ensayo.
- Retirar una probeta del baño de agua y secar cualquier exceso de agua con una toalla. Se coloca centrada en la mordaza inferior, se monta la mordaza superior con el medidor de deformación y el conjunto se sitúa centrado en la prensa. Colocar el medidor de flujo en posición, se ajusta a cero, y se mantiene su vástago firmemente contra la mordaza superior, mientras se aplica la carga de ensayo.

- A continuación, aplicar la carga sobre la probeta con la prensa a una tasa de deformación constante de 50 ± 5 mm/min hasta que ocurra la falla, es decir, cuando se advierte que se alcanza la máxima carga y luego comienza a decrecer. El procedimiento completo, desde la extracción de la probeta del baño de agua hasta su falla, no deberá exceder a más de 30 segundos.
- Anotar el valor de carga leído en el anillo dinamométrico y el valor de la deformación leído en el deformímetro.
- Se calcula el equivalente de resistencia en libras-fuerza de la lectura obtenida en el anillo dinamométrico, utilizando los valores de la tabla Humboldt Mfg. Co. corrección estabilidad Marshall (ver anexo 1).
- Al valor de resistencia se le aplica un factor de corrección, el cual está en función del volumen de la probeta ensayada, para esto se utiliza la tabla de factores de corrección de estabilidad medida (ver anexo 2).

4.4. Datos obtenidos y cálculos a realizar

A continuación, se presentan las tablas de todos los datos y los resultados obtenidos de cada ensayo descrito anteriormente.

Tabla XVI. **Datos y resultados de la gravedad específica *Bulk*, mezcla tradicional**

3,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 123,01	PESO SECO	1 130,44	PESO SECO	1 127,45
PESO SECO SATURADO	1 134,03	PESO SECO SATURADO	1 138,82	PESO SECO SATURADO	1 135,25
PESO SUMERGIDO	645,28	PESO SUMERGIDO	662,74	PESO SUMERGIDO	649,58
G _{mb}	2,30	G _{mb}	2,37	G _{mb}	2,32
4% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 026,54	PESO SECO	1 135,42	PESO SECO	1 133,00
PESO SECO SATURADO	1 032,70	PESO SECO SATURADO	1 142,02	PESO SECO SATURADO	1 137,69
PESO SUMERGIDO	594,71	PESO SUMERGIDO	656,09	PESO SUMERGIDO	656,23
G _{mb}	2,34	G _{mb}	2,34	G _{mb}	2,35
4,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1141,34	PESO SECO	1 137,89	PESO SECO	1 139,64
PESO SECO SATURADO	1144,39	PESO SECO SATURADO	1 140,66	PESO SECO SATURADO	1 144,17
PESO SUMERGIDO	667,45	PESO SUMERGIDO	667,10	PESO SUMERGIDO	659,96
G _{mb}	2,39	G _{mb}	2,40	G _{mb}	2,35
5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 136,13	PESO SECO	1 141,22	PESO SECO	1 141,47
PESO SECO SATURADO	1 138,16	PESO SECO SATURADO	1 143,07	PESO SECO SATURADO	1 143,09
PESO SUMERGIDO	674,58	PESO SUMERGIDO	667,83	PESO SUMERGIDO	677,32
G _{mb}	2,45	G _{mb}	2,40	G _{mb}	2,45
5,5% de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 145,35	PESO SECO	1 146,09	PESO SECO	1 135,24
PESO SECO SATURADO	1 147,07	PESO SECO SATURADO	1 146,38	PESO SECO SATURADO	1 136,67
PESO SUMERGIDO	670,45	PESO SUMERGIDO	677,06	PESO SUMERGIDO	669,23
G _{mb}	2,40	G _{mb}	2,44	G _{mb}	2,43

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Datos y resultados de la gravedad específica *Bulk*, mezcla modificada**

3,5 % de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 126,56	PESO SECO	1 131,70	PESO SECO	1 119,56
PESO SECO SATURADO	1 137,12	PESO SECO SATURADO	1 141,13	PESO SECO SATURADO	1 128,24
PESO SUMERGIDO	644,24	PESO SUMERGIDO	653,97	PESO SUMERGIDO	644,22
G _{mb}	2,29	G _{mb}	2,32	G _{mb}	2,31
4 % de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 131,86	PESO SECO	1 128,33	PESO SECO	1 139,42
PESO SECO SATURADO	1 139,21	PESO SECO SATURADO	1 135,81	PESO SECO SATURADO	1 148,86
PESO SUMERGIDO	647,92	PESO SUMERGIDO	652,66	PESO SUMERGIDO	657,49
G _{mb}	2,30	G _{mb}	2,34	G _{mb}	2,32
4,5 % de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1132,84	PESO SECO	1 143,32	PESO SECO	1 138,19
PESO SECO SATURADO	1139,74	PESO SECO SATURADO	1 146,55	PESO SECO SATURADO	1 142,56
PESO SUMERGIDO	653,97	PESO SUMERGIDO	664,09	PESO SUMERGIDO	660,08
G _{mb}	2,33	G _{mb}	2,37	G _{mb}	2,36
5 % de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 137,07	PESO SECO	1 148,69	PESO SECO	1 128,83
PESO SECO SATURADO	1 139,54	PESO SECO SATURADO	1 153,10	PESO SECO SATURADO	1 134,05
PESO SUMERGIDO	664,74	PESO SUMERGIDO	668,26	PESO SUMERGIDO	653,04
G _{mb}	2,39	G _{mb}	2,37	G _{mb}	2,35
5,5 % de cemento asfáltico					
Probeta #1		Probeta #2		Probeta #3	
PESO SECO	1 132,87	PESO SECO	1 143,89	PESO SECO	1 137,17
PESO SECO SATURADO	1 135,38	PESO SECO SATURADO	1 145,41	PESO SECO SATURADO	1 136,26
PESO SUMERGIDO	662,09	PESO SUMERGIDO	670,82	PESO SUMERGIDO	662,67
G _{mb}	2,39	G _{mb}	2,41	G _{mb}	2,40

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla tradicional**

Probeta 3,5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 384,60	G _{mm}	2,53
TARA + MATERIAL	1 380,00		
TARA	251,80		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 066,20		
Probeta 4 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 380,80	G _{mm}	2,54
TARA + MATERIAL	1 389,40		
TARA	250,90		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 069,00		
Probeta 4,5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 381,60	G _{mm}	2,50
TARA + MATERIAL	1 395,80		
TARA	259,00		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 064,30		
Probeta 5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 379,20	G _{mm}	2,48
TARA + MATERIAL	1 398,80		
TARA	253,80		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 060,90		
Probeta 5,5% de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 379,20	G _{mm}	2,47
TARA + MATERIAL	1 393,00		
TARA	261,20		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 054,50		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIX. **Datos y resultados de la gravedad específica teórica máxima, mezcla modificada**

Probeta 3,5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 385,30	G _{mm}	2,50
TARA + MATERIAL	1 371,30		
TARA	248,50		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 057,20		
Probeta 4 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 381,30	G _{mm}	2,48
TARA + MATERIAL	1 373,50		
TARA	247,00		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 053,90		
Probeta 4,5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 379,20	G _{mm}	2,46
TARA + MATERIAL	1 380,40		
TARA	248,20		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 058,00		
Probeta 5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 379,00	G _{mm}	2,47
TARA + MATERIAL	1 401,90		
TARA	249,10		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 063,10		
Probeta 5,5 % de cemento asfáltico			
PICNÓMETRO + AGUA	7 383,00	G _{mm}	2,46
TARA + MATERIAL	1 392,00		
TARA	249,40		
PICNÓMETRO + AGUA + MATERIAL	8 057,10		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla tradicional**

Probeta 3,5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,53
G _{mb}	2,33
VA (%)	7,81
Probeta 4 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,54
G _{mb}	2,34
VA (%)	7,65
Probeta 4,5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,50
G _{mb}	2,38
VA (%)	4,67
Probeta 5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,48
G _{mb}	2,43
VA (%)	1,98
Probeta 5,5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,47
G _{mb}	2,42
VA (%)	1,77

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXI. **Datos y resultados del porcentaje de vacíos, mezcla modificada**

Probeta 3,5 % de cemento asfáltico	
G _{mm}	2,50
G _{mb}	2,31
VA (%)	7,74

Continuación de la tabla XXI.

Probeta 4 % de cemento asfáltico	
Gmm	2,48
Gmb	2,32
VA (%)	6,32
Probeta 4,5 % de cemento asfáltico	
Gmm	2,46
Gmb	2,35
VA (%)	4,37
Probeta 5 % de cemento asfáltico	
Gmm	2,47
Gmb	2,37
VA (%)	4,13
Probeta 5,5 % de cemento asfáltico	
Gmm	2,46
Gmb	2,40
VA (%)	2,20

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXII. **Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla tradicional**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinamométrico (delft)	Flujo (0,01")	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
3,50	1	142	9	1 350,00	1,09	1 471,50
	2	165	9	1 567,40	1,09	1 708,47
4,00	1	128	10	1 216,92	1,32	1 606,33
	2	170	10	1 615,03	1,14	1 841,13
4,50	1	173	10	1 643,53	1,14	1 873,62
	2	212	10	2 012,19	1,14	2 293,90
5,00	1	224	12	2 125,48	1,19	2 529,32
	2	237	10	2 248,24	1,19	2 675,41
5,50	1	141	9	1 340,20	1,14	1 527,83
	2	160	13	1 519,78	1,19	1 808,54

Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resultados de la prueba de estabilidad y flujo Marshall, mezcla modificada**

Porcentaje de cemento asfáltico	Probeta	Lectura anillo dinamométrico (delft)	Flujo (0,01")	Estabilidad (lbf)	Factor de corrección (lbf)	Estabilidad corregida (lbf)
3,50	1	164	9	1 557,90	1,09	1 698,11
	2	176	9	1 671,68	1,09	1 822,13
4,00	1	193	12	1 832,12	1,09	1 997,01
	2	192	10	1 823,11	1,09	1 987,19
4,50	1	192	12	1 889,24	1,14	2 153,73
	2	201	10	1 917,88	1,14	2 186,38
5,00	1	145	14	1 378,33	1,14	1 571,30
	2	141	12	1 340,20	1,14	1 527,83
5,50	1	156	16	1 482,13	1,14	1 689,63
	2	160	14	1 519,78	1,14	1 732,55

Fuente: elaboración propia.

4.5. Análisis y comparación de resultados

En esta sección se presenta la tabulación de los resultados finales y sus respectivas gráficas, para compararlos y analizarlos con los valores de diseño que indican las normas y especificaciones.

4.5.1. Resumen de resultados

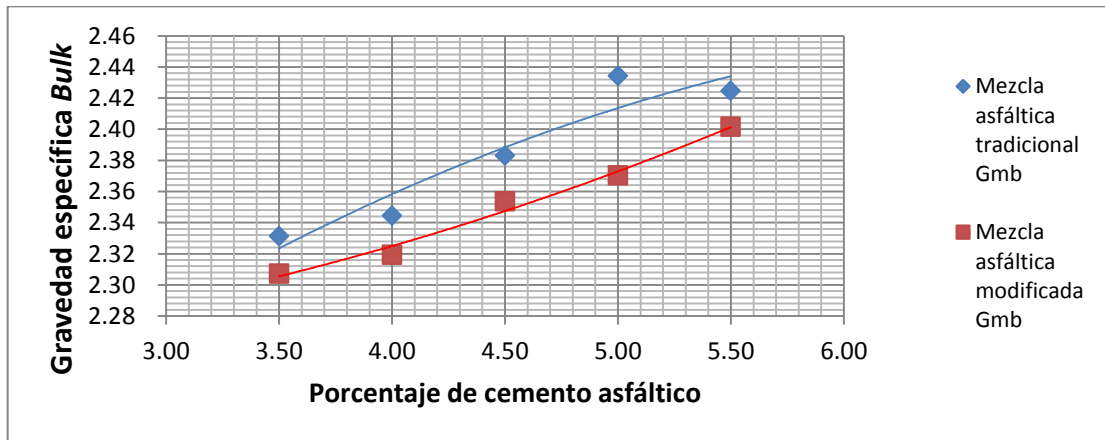
A continuación, en las tablas se presentan los resultados de forma comparativa, de los dos diseños realizados para esta investigación.

Tabla XXIV. Cuadro comparativo de gravedad específica *Bulk*

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mb}	Mezcla asfáltica modificada G_{mb}
3,50	2,33	2,31
4,00	2,34	2,32
4,50	2,38	2,35
5,00	2,43	2,37
5,50	2,42	2,40

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Gráfico de gravedad específica *Bulk*



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

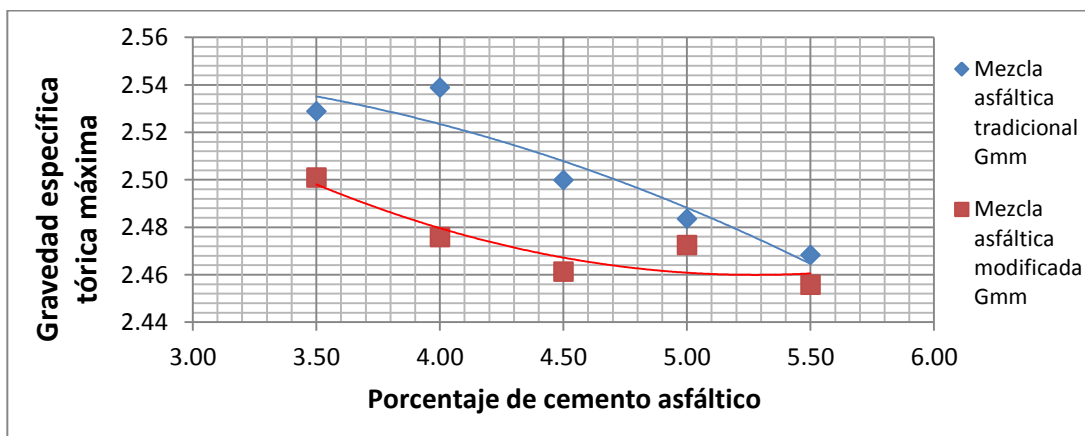
La variación que presentan los dos diseños de mezclas en la gravedad específica *Bulk* es debido a la incorporación de vidrio templado en la mezcla modificada, esto hace que su peso disminuya, debido a la densidad del vidrio templado que es más baja con respecto al material por el cual se sustituyó, así también la incorporación de la cal hace que la gravedad sea de menor peso.

Tabla XXV. Cuadro comparativo de gravedad específica teórica máxima

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional G_{mm}	Mezcla asfáltica modificada G_{mm}
3,50	2,53	2,50
4,00	2,54	2,48
4,50	2,50	2,46
5,00	2,48	2,47
5,50	2,47	2,46

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Gráfico de gravedad específica teórica máxima



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

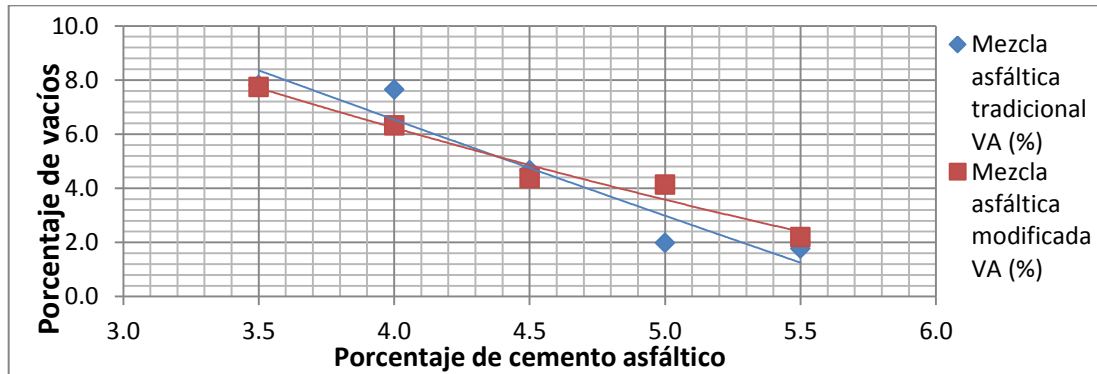
Al igual que en la gravedad específica *bulk*, en la teórica máxima la mezcla modificada baja su peso y es más estable que la mezcla tradicional, esto debido a que se utilizó menor cantidad de finos de la granulometría inicial, sustituyendo por el vidrio templado y la cal.

Tabla XXVI. Cuadro comparativo de porcentaje de vacíos y densidad

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional VA (%)	Mezcla asfáltica modificada VA (%)
3,50	7,81	7,74
4,00	7,65	6,32
4,50	4,67	4,37
5,00	1,98	4,13
5,50	1,77	2,20

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Gráfico de gravedad porcentaje de vacíos y densidad



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

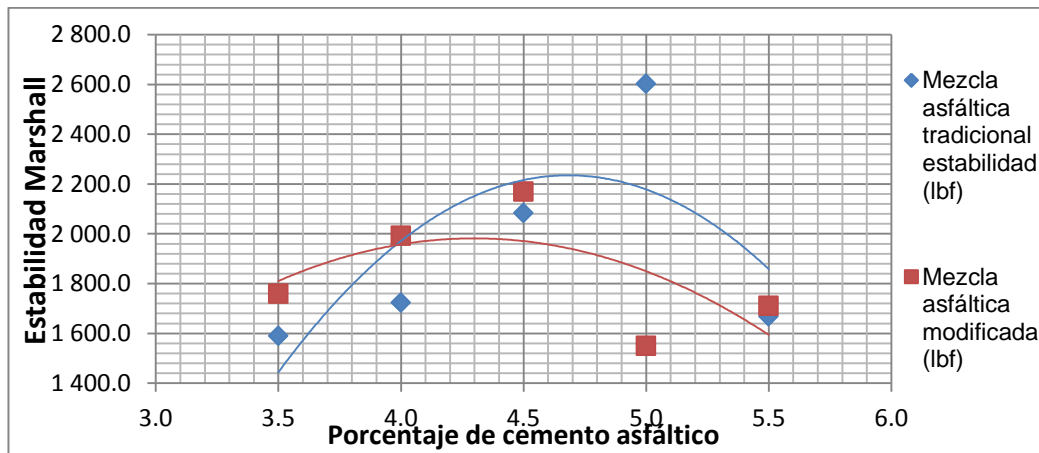
El contenido óptimo de cemento asfáltico para una mezcla tradicional se encuentra en un rango de 4,45 a 5 %, mientras que en la mezcla modificada el rango es de 4,4 a 5,25 % aproximadamente, esto se determinó por medio del porcentaje de vacíos, debido a que, si se utiliza el ligante en esos rangos, se garantiza estar dentro de los límites que indican las especificaciones las cuales son del 3 al 5 %.

Tabla XXVII. Cuadro comparativo de estabilidad Marshall

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional estabilidad (lbf)	Mezcla asfáltica modificada (lbf)
3,50	1 589,98	1 760,12
4,00	1 723,73	1 992,10
4,50	2 083,76	2 170,06
5,00	2 602,36	1 549,56
5,50	1 668,18	1 711,09

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Gráfico de estabilidad Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

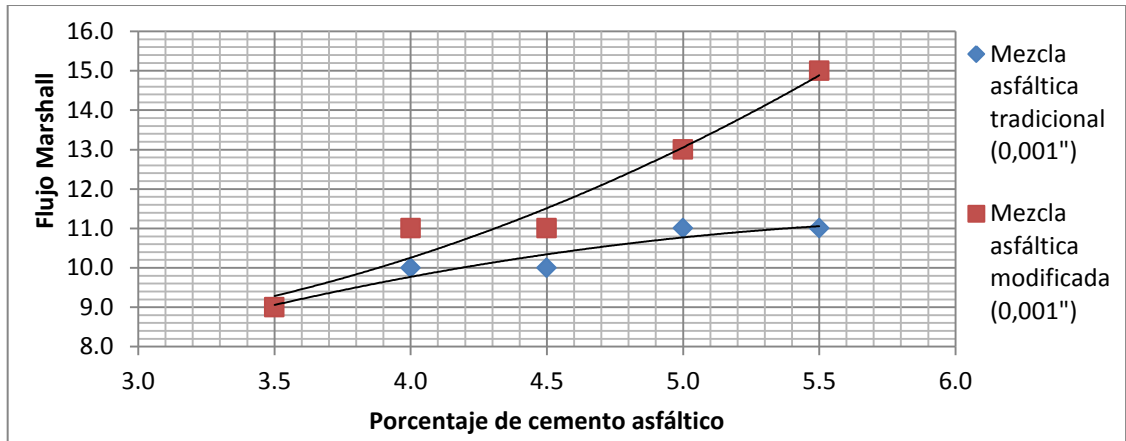
Basado en el valor mínimo de estabilidad Marshall (1 200 lbf), en una mezcla compactada, ambas mezclas cumplen con las especificaciones, la máxima estabilidad encontrada en la mezcla tradicional se encuentra con un 5 % de cemento asfáltico y en la mezcla modificada se encuentra en 4,5 %, esto quiere decir que ambas mezclas se encuentran dentro del rango de ligante óptimo respectivamente para cada mezcla.

Tabla XXVIII. Cuadro comparativo de flujo Marshall

Porcentaje de cemento asfáltico	Mezcla asfáltica tradicional (0,001")	Mezcla asfáltica modificada (0,001")
3,50	9,00	9,00
4,00	10,00	11,00
4,50	10,00	11,00
5,00	11,00	13,00
5,50	11,00	15,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Gráfico de flujo Marshall



Fuente: elaboración propia, empleando programa Microsoft Excel 2016.

Los valores de fluencia Marshall de ambas mezclas se encuentran dentro de los parámetros establecidos, la deformación en las mezclas se relaciona directamente por la cantidad que presentan de cemento asfáltico y fino, por ello la mezcla modificada se ve nuevamente afectada debido a la sustitución de material utilizado en la misma.

CONCLUSIONES

1. Empleando la metodología de Marshall con las especificaciones que establece la norma ASTM D 1559, con base a los resultados obtenidos de los ensayos realizados, el desempeño de ambas mezclas cumplen con los parámetros de porcentaje de vacíos, la estabilidad y flujo Marshall; sin embargo, la mezcla modificada presenta algunas variaciones mínimas, como se observa en las deformaciones, debido a que en las mezclas la deformación se relaciona por la cantidad que presentan de cemento asfáltico y fino, por ello la mezcla modificada se ve nuevamente afectada debido a la adición de cal hidratada y vidrio templado a la mezcla asfáltica, al momento de someter las probetas a la acción de cargas.
2. Según estadísticas del Departamento de reciclaje de vidriería guatemalteca, S.A. (VIGUA) el 55 % del total de vidrio producido es reciclado de diferentes maneras, en algunos casos se han logrado volúmenes de reciclado de un total de 35 000 toneladas métricas anuales; aproximadamente, de los cuales el 2,5 % corresponde a vidrio templado. En cuanto a la generación de residuos a nivel domiciliario, se estima un porcentaje de generación alrededor del 1 a 2,5 % del total de residuos a nivel nacional; un 3,2 % del total de residuos producidos a nivel metropolitano y un 4 % a nivel departamental.
3. La cantidad de volumen de vidrio templado y cal ideal en la mezcla asfáltica, para el mejoramiento de esta en sus propiedades y características, depende del tipo de granulometría que se tenga, el tipo y

la cantidad de cemento asfáltico a incorporar en la mezcla. En este trabajo se propuso utilizar vidrio templado en una cantidad del 10 % del tamiz No. 50 y cal en una cantidad del 5 % del tamiz No. 200, y cemento asfáltico AC-30. Por lo tanto, la cantidad óptima de vidrio templado y cal con la cual se logran mejores resultados en una mezcla asfáltica, deberá ser única para cada uno de los diseños establecidos por los diferentes estudios a realizar.

4. Al ensayar probetas en el laboratorio, con los diferentes métodos, normas y especificaciones, no se recrean las condiciones de carga a las que realmente estará sometido el pavimento, esto se ve reflejado en el análisis de la deformación, ya que este análisis se hace con base a una deformación permanente, impidiendo determinar el momento en que la mezcla deja de comportarse elásticamente.
5. Por medio del ensayo de porcentaje de vacíos y densidad, se determinó una reducción de estos en la mezcla modificada en comparación con la mezcla tradicional, esto debido a las características físicas de la cal y el vidrio templado, ya que ambos poseen un peso volumétrico menor al agregado fino utilizado en la mezcla tradicional.

RECOMENDACIONES

1. Si utiliza vidrio templado y cal hidratada como agregado fino en una mezcla asfáltica, se debe de determinar por medio de los diferentes ensayos de laboratorio, la cantidad adecuada de cada uno de los sustituyentes, para así mejorar de forma significativa las propiedades mecánicas y características físicas de esta, sin olvidar los parámetros de diseño ya definidos.
2. Cuando se desea diseñar y obtener resultados confiables en una mezcla asfáltica, se debe basar en los parámetros que rigen la norma ASTM D 3515 para los límites granulométricos; así también los parámetros establecidos en la norma ASTM D 1559 de la metodología Marshall. Se recomienda realizar cinco probetas por cada variación de contenido de asfalto en la mezcla. Esto tiene como fin, obtener un resultado más certero de cada uno de los ensayos, a partir de un promedio de las probetas que tengan mayor similitud en sus respectivos resultados.
3. En las mezclas que se incorpore vidrio templado y cal hidratada en sustitución de cierto porcentaje de material fino, se debe de realizar una granulometría para definir el tamaño y porcentaje de vidrio; se podrá agregar al diseño de la mezcla asfáltica y así poder definir el contenido óptimo de cemento asfáltico, evitando así incorporar más cemento asfáltico del necesario.

4. Para conocer más acerca del procedimiento de diseño de mezclas asfálticas en caliente, los ensayos que se deben realizar y la interpretación de los resultados de los mismos, se puede tomar como guía el Manual de Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala y el Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia, ya que ambos manuales toman como referencia las normas ASTM y AASHTO.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall Apparatus* ASTM D1559. EUA: ASTM, 2001. 4 p.
2. ANLEU HERNÁNDEZ, Erick Rolando. *Producción de mezclas asfálticas en caliente*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2002. 114 p.
3. Asphalt Institute. *Principios de construcción de pavimentos de mezcla asfáltica en caliente MS-22*. EUA. 1982. 292 p.
4. Holcalsa. *Cal hidratada*. [en línea]. <<http://horcalsa.com/cal-hidratada/>>. [Consulta: 7 de noviembre de 2017].
5. CAMPOS CRUZ, Carlos Antonio. *Evaluación del desempeño de la carpeta de rodadura de mezcla asfáltica tibia en comparación con el de la mezcla asfáltica caliente*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador. 2014. 341 p.
6. CASTAÑEDA ROSALES, Víctor Alejandro. *Rehabilitación de carreteras utilizando asfalto espumado, reciclando el pavimento asfáltico existente*. Trabajo de graduación Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2011. 112 p.

7. DÁVILA ELÍAS, Edgar Alejandro. *Actualidad y desarrollo del uso del vidrio templado en la construcción*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2012. 94 p.
8. Dirección General de Caminos. *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Cámara Guatemalteca de la Construcción, 2001. 724 p.
9. SÁNCHEZ SABOGAL, Fernando. *Diseño de mezclas asfálticas*. [en línea]. <http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1-_130_181_83_1181.pdf>. [Consulta: 10 de noviembre de 2017].
10. CASTILLO, Jair. *El Vidrio*. [en línea]. <<https://es.scribd.com/document/270085003/EL-VIDRIO>>. [Consulta: 20 de octubre de 2017].
11. GUZMÁN LÓPEZ, Manuel Ramón. Evaluación del desempeño de la carpeta de rodadura de mezcla asfáltica tibia en comparación con el de la mezcla asfáltica caliente. [en línea]. <<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6296/1/Evaluaci%C3%B3n%20del%20desempe%C3%B1o%20de%20la%20carpeta%20de%20rodadura%20de%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20tibia%20en%20comp araci%C3%B3n%20con%20el%20de%20la%20mezcla%20asf%C3%A1ltica%20caliente.pdf>>. [Consulta: 10 de diciembre de 2017].

12. Instituto Nacional de Vías. *Manual de normas de ensayo de materiales para carreteras, Secciones 700 y 800, Materiales y mezclas asfálticas y prospección de pavimentos*. Colombia: INVIAS, 2012. 626 p.
13. LEÓN FAJARDO, José Luis. *Criterios para el Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente*. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 1996.
14. PEARSON, Carlos. *Manual del Vidrio Plano*. [en línea]. <<https://studylib.es/doc/4512002/-manual-del-vidrio-plano>>. [Consulta: 2 de noviembre de 2017].
15. PADILLA RODRÍGUEZ, Alejandro. *Mezclas Asfálticas*. [en línea]. <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-14.pdf?sequence=14>>. [Consulta: 9 de noviembre de 2017].
16. *Reporte Nacional de Manejo de Residuos en Guatemala*. Residuo: vidrio, Centro Guatemalteco de Producción más Limpia. Guatemala, 2004. 25 p.
17. SUQUE SOC, Carlos Eduardo. *Utilización de desecho de vidrio templado como árido grueso para la elaboración de concreto*. Trabajo de graduación de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2016. 89 p.

18. ARCOS BASILIO, Luis Alberto. *Trabajo Final de Proceso de Manufactura y Tecnología de Materiales*. [en línea]. <http://www.academia.edu/29058870/Trabajo_Final_de_Proceso_de_Manufactura_y_Tecnolog%C3%ADa_de_Materiales>. [Consulta: 30 de octubre de 2017].

APÉNDICES

Apéndice 1. **Juego de tamices utilizado para la separación del agregado**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 2. **Material retenido en cada uno de los tamices**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 3. **Vidrio templado retenido en cada uno de los tamices**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 4. **Cal utilizada en el diseño de mezcla**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Apéndice 5. **Probetas compactadas a diferentes porcentajes de bitumen**



Fuente: Laboratorio de Asfaltos. Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de calibración para el aparato Marshall

HUMBOLDT MFG. CO.
7300 W. AGATITE AVE.
NORRIDGE, IL 60706

4 SEP 20

RECOMMEND RECALIBRATION ONE YEAR FROM START OF USE AFTER LAST CALIBRATION
CALIBRATION FOR MODEL H-4454.100 11000 LBF SERIAL 2366 BY *B. Beackerman*
CALIBRATED USING LOAD CELL 626314 CAL. DATE 10/11/07 DEFLT=.0001 in.

LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT	LBF	DEFLT
0	.1	1000	105.1	3500	370.0	6000	637.9	8500	908.9
20	2.2	1050	110.4	3550	375.3	6050	643.3	8550	914.4
40	4.3	1100	115.7	3600	380.7	6100	648.7	8600	919.8
60	6.4	1150	121.0	3650	386.0	6150	654.1	8650	925.3
80	8.5	1200	126.2	3700	391.3	6200	659.5	8700	930.7
100	10.5	1250	131.5	3750	396.7	6250	664.9	8750	936.2
120	12.6	1300	136.8	3800	402.0	6300	670.3	8800	941.6
140	14.7	1350	142.0	3850	407.3	6350	675.7	8850	947.1
160	16.8	1400	147.3	3900	412.7	6400	681.1	8900	952.6
180	18.9	1450	152.6	3950	418.0	6450	686.5	8950	958.0
200	21.0	1500	157.9	4000	423.3	6500	691.9	9000	963.5
220	23.1	1550	163.2	4050	428.7	6550	697.3	9050	968.9
240	25.2	1600	168.4	4100	434.0	6600	702.7	9100	974.4
260	27.3	1650	173.7	4150	439.4	6650	708.1	9150	979.9
280	29.4	1700	179.0	4200	444.7	6700	713.5	9200	985.3
300	31.5	1750	184.3	4250	450.1	6750	718.9	9250	990.8
320	33.6	1800	189.6	4300	455.4	6800	724.3	9300	996.3
340	35.7	1850	194.9	4350	460.8	6850	729.7	9350	1001.8
360	37.8	1900	200.1	4400	466.1	6900	735.1	9400	1007.2
380	39.9	1950	205.4	4450	471.5	6950	740.5	9450	1012.7
400	42.0	2000	210.7	4500	476.8	7000	746.0	9500	1018.2
420	44.1	2050	216.0	4550	482.2	7050	751.4	9550	1023.6
440	46.2	2100	221.3	4600	487.5	7100	756.8	9600	1029.1
460	48.3	2150	226.6	4650	492.9	7150	762.2	9650	1034.6
480	50.4	2200	231.9	4700	498.2	7200	767.6	9700	1040.1
500	52.5	2250	237.2	4750	503.6	7250	773.0	9750	1045.6
520	54.6	2300	242.5	4800	508.9	7300	778.5	9800	1051.0
540	56.7	2350	247.8	4850	514.3	7350	783.9	9850	1056.5
560	58.8	2400	253.1	4900	519.7	7400	789.3	9900	1062.0
580	61.0	2450	258.4	4950	525.0	7450	794.7	9950	1067.5
600	63.1	2500	263.7	5000	530.4	7500	800.2	10000	1073.0
620	65.2	2550	269.0	5050	535.8	7550	805.6	10050	1078.5
640	67.3	2600	274.3	5100	541.1	7600	811.0	10100	1084.0
660	69.4	2650	279.6	5150	546.5	7650	816.4	10150	1089.5
680	71.5	2700	284.9	5200	551.9	7700	821.9	10200	1094.9
700	73.6	2750	290.2	5250	557.2	7750	827.3	10250	1100.4
720	75.7	2800	295.5	5300	562.6	7800	832.7	10300	1105.9
740	77.8	2850	300.8	5350	568.0	7850	838.2	10350	1111.4
760	79.9	2900	306.2	5400	573.3	7900	843.6	10400	1116.9
780	82.0	2950	311.5	5450	578.7	7950	849.0	10450	1122.4
800	84.1	3000	316.8	5500	584.1	8000	854.5	10500	1127.9
820	86.2	3050	322.1	5550	589.5	8050	859.9	10550	1133.4
840	88.3	3100	327.4	5600	594.9	8100	865.4	10600	1138.9
860	90.4	3150	332.7	5650	600.2	8150	870.8	10650	1144.4
880	92.5	3200	338.1	5700	605.6	8200	876.2	10700	1149.9
900	94.6	3250	343.4	5750	611.0	8250	881.7	10750	1155.4
920	96.7	3300	348.7	5800	616.4	8300	887.1	10800	1160.9
940	98.8	3350	354.0	5850	621.8	8350	892.6	10850	1166.4
960	100.9	3400	359.3	5900	627.2	8400	898.0	10900	1172.0
980	103.0	3450	364.7	5950	632.5	8450	903.5	10950	1177.5


Fuente: Humboldt Mfg. Co. p. 1.

Anexo 2. **Tabla de factores de correcciones estabilidad Marshall**


Volumen de la probeta (cm ³)	Espesor de la probeta		Factor de corrección
	mm	pg	
290 a 301	36,5	1,44	3,03
302 a 316	38,1	1,50	2,78
317 a 328	39,7	1,56	2,50
329 a 340	41,3	1,62	2,27
341 a 353	42,9	1,69	2,08
354 a 367	44,4	1,75	1,92
368 a 379	46,0	1,81	1,79
380 a 392	47,6	1,88	1,67
393 a 405	49,2	1,94	1,56
406 a 420	50,8	2,00	1,47
421 a 431	52,4	2,06	1,39
432 a 443	54,0	2,12	1,32
444 a 456	55,6	2,19	1,25
457 a 470	57,2	2,25	1,19
471 a 482	58,7	2,31	1,14
483 a 495	60,3	2,38	1,09
496 a 508	61,9	2,44	1,04
509 a 522	63,5	2,50	1,00
523 a 535	65,1	2,56	0,96
536 a 546	66,7	2,62	0,93
547 a 559	68,3	2,69	0,89
560 a 573	69,8	2,75	0,86
574 a 585	71,4	2,81	0,83
586 a 598	73,0	2,88	0,81
599 a 610	74,6	2,94	0,78
611 a 626	76,2	3,00	0,76

Fuente: Dirección General de Caminos. *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras y Puentes*. p. 489.

Anexo 3. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall con residuos de vidrio.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



No. 15697

INFORME NUMERO: 001 S.S.A.

ORDEN DE TRABAJO: 39289

INTERESADO: CARLOS FRANCISCO GÓMEZ JERÓNIMO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO Y CAL COMPARADO CON UNA MEZCLA TRADICIONAL

DIRECCION: CII/USAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 6927-15

FECHA: 10 DE ENERO DEL 2019

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA CON RESIDUO DE VIDRIO (MODIFICADA)

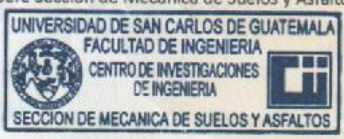
OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

PORCENTAJE DE EMULSION Y AGUA POR PROBETA	ESTABILIDAD LBF CORREGIDA	FLUJO 0,01"
3,5	1698,11	9
3,5	1822,13	9
4	1997,01	12
4	1987,19	10
4,5	2153,73	12
4,5	2186,38	10
5	1571,30	14
5	1527,83	12
5,5	1689,63	16
5,5	1732,55	14

Atentamente,


Vo. Bo. :

Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos



[Signature]


Ing. Edwin Josué Ixpata Reyes
Director CII/USAC




FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltránena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 4. Ensayo de estabilidad y flujo Marshall sin residuos de vidrio.



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



No. 15698

INFORME NUMERO: 002 S.S.A.

ORDEN DE TRABAJO: 39289

INTERESADO: CARLOS FRANCISCO GÓMEZ JERÓNIMO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO Y CAL COMPARADO CON UNA MEZCLA TRADICIONAL

DIRECCION: CII/USAC

ENSAYO: ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL ASTM D 6927-15


FECHA: 10 DE ENERO DEL 2019

MUESTRA: MEZCLA ASFALTICA CON RESIDUO DE VIDRIO (TRADICIONAL)

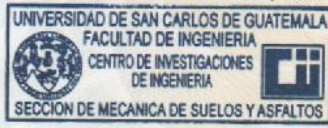
OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO


PORCENTAJE DE BITUMEN	ESTABILIDAD LBF CORREGIDA	FLUJO 0,01"
3,5	1471,50	9
3,5	1708,47	9
4	1606,33	10
4	1841,13	10
4,5	1873,62	10
4,5	2293,90	10
5	2529,32	12
5	2675,41	10
5,5	1527,83	9
5,5	1808,54	13

Atentamente,


Vo. Bo. : 

Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos






Ing. Edwin Jpsué Ixpan
Directpr CII/USAC




FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 6. **Densidad específica bruta sin residuos de vidrio**



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME NUMERO: 004 S.S.A.

ORDEN DE TRABAJO: 39289

No. 15700

INTERESADO: CARLOS FRANCISCO GÓMEZ JERÓNIMO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO Y CAL COMPARADO CON UNA MEZCLA TRADICIONAL

DIRECCION: CII/USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA DE BULK ASTM 2726-05a

FECHA: 10 DE ENERO DEL 2019

MUESTRA: MUESTRA ASFÁLTICA CON RESIDUO DE VIDRIO

OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCINADA POR EL INTERESADO


PORCENTAJE DE BITUMEN	PROBETAS	FLUJO 0,01"
3,5	1	2,30
3,5	2	2,37
4	1	2,34
4	2	2,34
4,5	1	2,39
4,5	2	2,40
5	1	2,45
5	2	2,40
5,5	1	2,40
5,5	2	2,44


Atentamente,

Vo. Bo. :

Ornair Enrique Medrano Méndez
Ing. Ornair Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos

Edwin Josué Ixpata Reyes
Ing. Edwin Josué Ixpata Reyes
Director CII/USAC







FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 7. Densidad teórica máxima



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME NUMERO: 005 S.S.A.

ORDEN DE TRABAJO: 39289

No. 15701

INTERESADO: CARLOS FRANCISCO GÓMEZ JERÓNIMO

PROYECTO: TRABAJO DE GRADUACION: PROPIEDADES MECÁNICAS, DE UN CONCRETO ASFÁLTICO MODIFICADO CON RESIDUOS DE VIDRIO Y CAL COMPARADO CON UNA MEZCLA TRADICIONAL

DIRECCION: CII/USAC

ENSAYO: DENSIDAD ESPECIFICA TEORICA MAXIMA "RICE" ASTM 2041

FECHA: 10 DE ENERO DEL 2019

MUESTRA: MUESTRA ASFÁLTICA CON RESIDUOS DE VIDRIO


OBSERVACIONES: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL INTERESADO

PORCENTAJE DE ASFALTO SIN MODIFICAR	Gmm
3,50%	2,5300
4,00%	2,5400
4,50%	2,5000
5,00%	2,4800
5,50%	2,4700


PORCENTAJE DE ASFALTO MODIFICADO	Gmm
3,50%	2,5000
4,00%	2,4800
4,50%	2,4600
5,00%	2,4700
5,50%	2,4600

Atentamente,



Vo. Bo. :



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección de Mecánica de Suelos y Asfaltos



Ing. Edwin Josue Ixpata Reyes
Director CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

