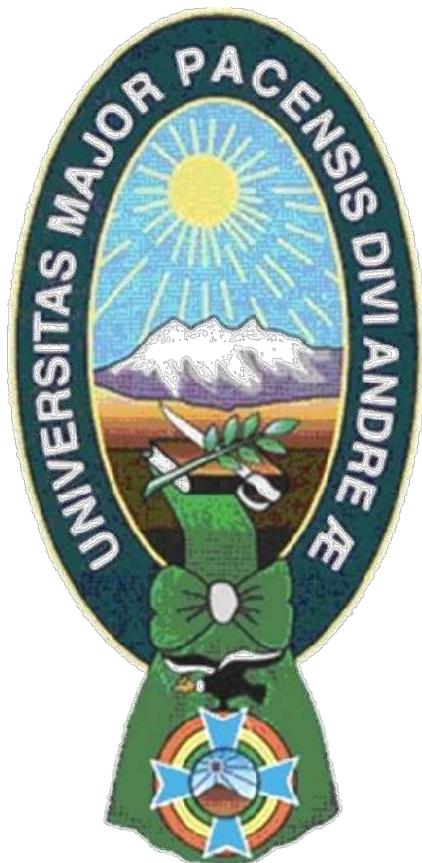


UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

I.E.M.
INSTITUTO DE ENSAYO DE MATERIALES
“ING. HUGO MANSILLA ROMERO”



PROYECTO DE GRADO

**“ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE
PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)”**

POSTULANTE: ELIO COYO QUISPE

TUTOR: M.Sc. ING. OSCAR LUIS PEREZ LOAYZA

LA PAZ – BOLIVIA

2019



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mi familia por confiar y creer en mí.

A mi hermanita Delia por su paciencia, apoyo, por alcanzarme un plato de comida y una taza de café en las largas noches de estudio, a mi hermanita Alina por su paciencia, a mi hermano Ever Celio, y a mi cuñado por su apoyo durante este tiempo.

A tod@s mis primas, primos, tíos y tías por su apoyo.

Y en especial dedico esta tesis a mi madre, mi mamita querida por creer y confiar en mí, por todo su esfuerzo, apoyo y su amor infinito.

AGRADECIMIENTO

A Dios, que fue mi principal apoyo y motivador en la culminación de este proyecto.

A todos mis docentes, al personal del laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales – IEM y en especial al M.Sc. Ing. Oscar Luis Pérez Loayza por su colaboración y ser la guía fundamental en la elaboración de este proyecto y a mis tribunales por su tiempo en la revisión de este proyecto de grado.

A mi Universidad Mayor de San Andrés, mi Facultad de Ingeniería, y mi querida carrera de Ingeniería Civil, mi segundo hogar gracias por acogerme en sus aulas durante la vida universitaria y permitirme formarme como profesional.

Y a todas las personas que fueron partícipes de este proyecto, ya sea de manera directa o indirecta.

CONTENIDO

1	CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN GENERAL.....	2
1.1	JUSTIFICACIÓN GENERAL.....	2
1.2	FINES	8
1.3	ESTADO DEL ARTE.....	8
1.4	OBJETIVO GENERAL.....	11
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.6	ALCANCE DEL PROYECTO.....	11
1.7	METODOLOGÍA.....	11
2	CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	14
2.1	CEMENTOS ASFÁLTICOS.....	14
2.1.1	GENERALIDADES	14
2.1.2	DEFINICIÓN.....	15
2.1.3	COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO.....	15
2.1.3.1	MÉTODO DE FRACCIONAMIENTO CON SOLVENTE.....	16
2.1.3.2	MÉTODO DE SEPARACIÓN CROMATOGRAFÍA	16
2.1.4	PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO.....	17
2.1.5	PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ASFALTO.....	19
2.2	CLASIFICACIÓN	21
2.2.1	CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO POR SU USO EN PAVIMENTOS.....	21
2.2.1.1	EMULSIONES ASFÁLTICAS.....	22
2.2.1.2	ASFALTOS DILUIDOS.....	22
2.2.1.3	ASFALTOS ESPUMADOS.....	23
2.2.1.4	CRUDOS PESADOS.....	23
2.2.1.5	ASFALTOS NATURALES.....	23
2.2.1.6	CEMENTO ASFÁLTICO	23
2.2.1.7	ASFALTOS MODIFICADOS.....	27
2.3	ASFALTOS MODIFICADOS.....	27
2.3.1	ASFALTOS MODIFICADOS CON MATERIALES DE DESECHO	29
2.4	MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	29
2.4.1	CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS.....	31
2.4.1.1	POR EL PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO	31

2.4.1.2	POR EL CONTENIDO DE VACÍOS EN LA MEZCLA.....	31
2.4.1.3	POR EL TAMAÑO DEL AGREGADO	32
2.4.1.4	POR LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO	32
2.4.1.5	POR SU GRANULOMETRÍA	32
2.4.1.6	POR LAS FRACCIONES DE AGREGADO EN LA MEZCLA.....	32
2.5	RECICLADO EN BOLIVIA	32
2.6	PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)	34
3	CAPÍTULO III: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	37
3.1	EVOLUCIÓN DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.....	38
3.2	MÉTODO MARSHALL.....	39
3.2.1	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO.....	40
3.2.2	PRUEBAS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS	41
3.3	DEFORMACIONES PLÁSTICAS	42
3.4	ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN EL CONCRETO ASFÁLTICO.....	43
4	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS	47
4.1	INTRODUCCIÓN	47
4.2	FUENTE DE PROVISIÓN DE AGREGADOS	47
4.3	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO.....	48
4.4	EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA.....	48
4.5	CUARTEO DE MUESTRAS	49
4.6	ENSAYOS REALIZADOS A LOS MATERIALES PÉTREOS	50
4.6.1	ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS	50
4.6.1.1	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (ASTM E-127 AASHTO T85-91)	50
4.6.1.2	PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (ASTM E-128, AASHTO T84).....	52
4.6.2	ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES EN CONSENSO	53
4.6.2.1	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO PÉTREO.....	53
4.6.2.2	PORCENTAJE DE CARAS PRODUCIDAS POR FRACTURAS	54
4.6.2.3	PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS (ASTM-D4791)	55
4.6.2.4	EQUIVALENTE ARENA DEL AGREGADO FINO (ASTM D2419).....	56
4.6.3	ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE ORIGEN	57

4.6.3.1	RESISTENCIA AL DESGATE POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (ASTM E-131, AASHTO T96)	57
4.6.4	ESPECIFICACIONES	58
4.7	RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS	59
5	CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADO	61
5.1	INTRODUCCIÓN	61
5.2	PROCEDENCIA DEL CEMENTO ASFÁLTICO	61
5.3	EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	61
5.4	MODIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL CON MATERIAL DE DESECHO (BUMPER)	62
5.4.1	OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MATERIAL DE DESECHO (BUMPER)	62
5.4.2	EQUIPOS UTILIZADOS	63
5.4.3	PROCESO DE MODIFICACIÓN	63
5.5	ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADOS	64
5.5.1	PESO ESPECÍFICO (ASTM D70-76, AASHTO T228-90)	65
5.5.2	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS A 25°C (ASTM D5)	66
5.5.3	ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN (AASHTO T79-96, ASTM D1310 – 01)	67
5.5.4	DUCTILIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS (ASTM 113, AASHTO T51-00)	68
5.5.5	ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (EQUIPO ANILLO Y BOLA) (ASTM D36, AASHTO T53)	70
5.5.6	SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (ASTM D2042-94, AASHTO T44-97)	71
5.5.7	PELÍCULA DELGADA (ASTM D1754, AASHTO T179), PELÍCULA DELGADA ROTATORIA (RTFOT) (ASTM D2872, AASHTO T240)	72
5.5.7.1	PELÍCULA DELGADA GIRATORIA	73
5.5.7.2	PELÍCULA DELGADA ROTATORIA (RTFOT)	74
5.5.8	ENSAYO DE LA MANCHA (AASHTO T102-83)	76
5.5.9	VISCOSIDAD BROOKFIELD (ASTM D4402, AASHTO TP 48)	76
5.5.10	ENSAYO DE PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS (IP 80-53)	78
5.5.11	ENSAYO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA (ASTM D6084-06, AASHTO T301-99)	79
5.5.12	ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO (NLT-328/91)	80

5.6	RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADOS	83
6	CAPÍTULO VI: DISEÑO, ELABORACIÓN, ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	86
6.1	INTRODUCCIÓN	86
6.2	ESPECIFICACIONES DE LA ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA.....	86
6.3	DISEÑO DE LA ESTRUCTURA GRANULOMÉTRICA.....	90
6.4	TEMPERATURA DE MEZCLADO Y COMPACTADO	94
6.5	ELABORACIÓN DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	94
6.5.1	PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE ENSAYO	94
6.5.2	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE PROBETAS	95
6.5.3	PREPARACIÓN DEL EQUIPO, MOLDE Y MARTILLO	95
6.5.4	DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE GOLPES PARA LA COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS	96
6.5.5	PREPARACIÓN DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	97
6.5.6	ELABORACIÓN DE LAS BRIQUETAS	97
6.5.7	DESMOLDE DE BRIQUETAS	98
6.6	EVALUACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS (PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS)	99
6.6.1	CONTROL DE LAS DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS.....	99
6.6.2	PESO ESPECÍFICO (BULK) (ASTM D1188, AASHTO T166).....	99
6.6.3	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y FLUENCIA	100
6.6.4	ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS (ASTM D2041, AASHTO T209).....	100
6.7	ESPECIFICACIONES.....	101
6.8	DISEÑO MARSHALL	102
6.8.1	ASFALTO CONVENCIONAL ECOPETROL 60/70 COLOMBIANO.....	102
6.8.2	ASFALTO MODIFICADO CON BUMPER	104
6.9	EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS	107
6.9.1	INTRODUCCIÓN	107
6.9.2	ENSAYO DE WHEEL TRACKING TEST (WTT).....	107
6.9.2.1	EQUIPOS UTILIZADOS	107
6.9.2.2	PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	107
6.9.2.3	EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE LA RUEDA CARGADA.....	108
6.9.2.4	RESULTADOS DEL ENSAYO DE AHUELLAMIENTO	109

6.10	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE MATERIAL MODIFICANTE (BUMPER) REQUERIDA PARA UNA TRAMO DE PAVIMENTO	110
6.11	SALUD Y SEGURIDAD OCUPACIONAL.....	111
6.11.1	INTRODUCCIÓN	111
6.11.2	RIESGOS GENERALES EN LA MANIPULACION DE PRODUCTOS ASFÁLTICOS 111	
6.11.3	RIESGOS EN LABORATORIOS	112
6.11.4	PLANTA DE PRODUCCIÓN DEL ASFALTO	114
6.11.4.1	ELEMENTOS DE PROTECCION PERSONAL (EPP)	114
6.11.5	IMPACTO AL MEDIO AMBIENTE EN LA OPERACIÓN DE LAS PLANTAS PARA MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE.	117
6.11.5.1	RECUPERACIÓN AMBIENTAL.....	119
7	CAPÍTULO VII: COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN DE DOS ASFALTOS DE DISTINTA PROCEDENCIA.....	122
7.1	INTRODUCCIÓN	122
7.1.1	CARACTERIZACIÓN DE AMBOS ASFALTOS	122
7.1.2	DATOS DE DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DE AMBOS ASFALTOS.....	128
8	CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	131
8.1	CONCLUSIONES	131
8.2	RECOMENDACIONES.....	135
9	BIBLIOGRAFÍA	136
	ANEXOS.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Inversión en carreteras 1998 – 2016.....	2
Figura 2: Red Vial Fundamental 2020.....	5
Figura 3: Carretera Yucumo – Quiquibey	6
Figura 4: Doble vía La Paz - Oruro	6
Figura 5: Esquema de la Fabricación de los Productos Asfálticos	14
Figura 6: Composición del Asfalto.....	16
Figura 7: Composición del Asfalto con la Técnica Combinada de Separación.....	17
Figura 8: Aumento de Viscosidad Debido al Calentamiento de una Película Delgada del Asfalto	19
Figura 9: Diagrama de la Prueba de Penetración.....	26
Figura 10: Composición Media, Origen y Porcentaje de Recuperación de Residuos Sólidos	33
Figura 11: Reciclado de Materiales de Desecho.....	34
Figura 12: Parachoques de Vehículos.....	35
Figura 13: Extracción de Muestras de Agregados Pétreos	49
Figura 14: Cuarteo Mecánico de los Agregados.....	49
Figura 15: Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso	51
Figura 16: Peso Específico y Absorción en Agregados Finos	52
Figura 17: Granulometría de los Agregados Pétreos	53
Figura 18: Ensayo de la Granulometría de los Agregados Pétreos.....	54
Figura 19: Ensayo de Caras Producidas por Fracturas	55
Figura 20: Ensayo de Partículas Planas y Alargadas	56
Figura 21: Extracción e Identificación de la Muestra.....	61
Figura 22: Preparación de Material de Desecho	62
Figura 23: Equipo Utilizado Para la Modificación del Asfalto	63
Figura 24: Modificación del Asfalto.....	64
Figura 25: Ensayo de Peso Específico	65
Figura 26: Ensayo de Penetración.....	66
Figura 27: Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión	68
Figura 28: Ensayo de Ductilidad.....	69
Figura 29: Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo Y Bola)	70
Figura 30: Ensayo de Solubilidad en Tricloroetileno	72
Figura 31: Preparación de Muestras Película Delgada TFOT	73
Figura 32: Ensayo de Película Delgada Giratoria.....	73
Figura 33: Ensayo de Película Delgada Rotatoria	74
Figura 34: Ensayo de la Mancha.....	76
Figura 35: Ensayo de Viscosidad Brookfield	77
Figura 36: Ensayo de Punto de Fragilidad Fraass.....	78
Figura 37: Ensayo de Recuperación Elástica.....	80

Figura 38: Estabilidad de Almacenamiento	81
Figura 39: Límites Para las Granulometrías Superpave (Gráfica Fuller)	89
Figura 40: Curva Granulométrica – Instituto de Asfaltos.....	90
Figura 41: Curva Granulométrica – Administradora Boliviana de Carreteras	91
Figura 42: Curva Granulométrica – ASTM D 3515	92
Figura 43: Curva Granulométrica – Especificación SUPERPAVE	93
Figura 44: Preparación del Equipo, Molde y Martillo	96
Figura 45: Preparación de los Agregados Pétreos	97
Figura 46: Elaboración de Briquetas.....	98
Figura 47: Desmoldado de Briquetas.....	98
Figura 48: Determinación de las Dimensiones de Briquetas	99
Figura 49: Determinación del Peso Específico (Bulk)	99
Figura 50: Estabilidad y Fluencia	100
Figura 51: Ensayo de Rice	101
Figura 52: Preparación de Muestras Para el Ensayo de Ahuellamiento	108
Figura 53: Ensayo de Ahuellamiento.....	108
Figura 54: Deformación de la Mezcla con Asfalto Convencional.....	109
Figura 55: Deformación de la Mezcla con Asfalto Modificado (2% Bumper)	109
Figura 56: Elementos o Equipos de Seguridad	112
Figura 57: Elementos de Seguridad Empleados en los Diferentes Ensayos del Proyecto	112
Figura 58: Elementos de Protección Empleados en la Manipulación de Agregados	113
Figura 59: Equipos Empleados en la Elaboración de Marshall	113
Figura 60: Plantas Asfálticas (Esquema Planta Asfáltica de Proceso Continuo)	114
Figura 61: Elementos de protección personal	116
Figura 62: Funcionamiento de una Planta Asfáltica	120
Figura 63: Proceso de Modificación del Asfalto Convencional con Modificante.....	131

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Kilómetros Concluidos 2011 – 2015	3
Tabla 2: Kilómetros Construidos 2016 – 2020 por Programa y Corredor.....	3
Tabla 3: Kilómetros Construidos 2016 – 2020 por Departamento	4
Tabla 4: Inversión Total 2016 – 2020 por Corredor (Expresado en dólares estadounidenses)	4
Tabla 5: Requisitos Para Cemento Asfáltico Clasificado Por Viscosidad A 60°C.....	24
Tabla 6: Requisitos Para Cemento Asfáltico Clasificado Por Viscosidad A 60°C.....	25
Tabla 7: Sistema de Clasificación por Penetración requisitos	26
Tabla 8: Propiedades de los Diferentes Ensayos Para la Evaluación de Ahuellamiento.....	44
Tabla 9: Tamaños Máximos de Partículas Utilizados.....	48
Tabla 10: Ensayos de Caracterización a los Agregados Pétreos.....	50
Tabla 11: Peso Seco Mínimo Para el Ensayo de Peso específico – Agregado Grueso.	51
Tabla 12: resultados de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso	51
Tabla 13: Resultados de Peso Específico y Absorción del Agregado Fino	52
Tabla 14: Pesos Mínimos de la Muestra Para el Ensayo de Granulometría.	53
Tabla 15: Preparación de la muestra. Ensayo de Angularidad.	54
Tabla 16: Resultados de Partículas Caras Fracturadas	55
Tabla 17: Porcentajes de Partículas Planas y Alargadas del Agregado	56
Tabla 18: Resultados de Ensayo de Equivalente Arena.....	57
Tabla 19: Gradación y Peso de la Muestra.	57
Tabla 20: Ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles.....	58
Tabla 21: Resultados Resistencia al Desgaste por Abrasión	58
Tabla 22: Especificaciones de los Agregados Según la Norma ASTM D3515.....	59
Tabla 23: Resumen de los Resultados de Ensayo a los Agregados Pétreos	59
Tabla 24: Ensayos Para la Caracterización de los Cementos Asfálticos Modificados y No Modificados	65
Tabla 25: Resultados, Ensayo de Penetración de Ambos Asfaltos.....	66
Tabla 26: Resultados del Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión	68
Tabla 27: Resultados del Ensayo de Ductilidad	69
Tabla 28: Resultados de Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola)	71
Tabla 29: Resultado del Ensayo de Solubilidad en Tricloroetileno.....	72
Tabla 30: Resultados Obtenidos Sobre el Residuo de la Película Delgada	74
Tabla 31: Resultados del Ensayo de Película Delgada Rotatoria	74
Tabla 32: Resultados de la Viscosidad Brookfield.....	77
Tabla 33: Resultados de Punto de Fragilidad Fraass	79
Tabla 34: Recuperación Elástica.....	80
Tabla 35: Resultados del Ensayo de Estabilidad al Almacenamiento	81
Tabla 36: Resultados de la Caracterización del Asfalto Convencional	83
Tabla 37: Resultados de los Ensayos Realizados en Laboratorio a Asfaltos Modificados	84

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

Tabla 38: Especificaciones Granulométricas Según el Instituto del Asfalto	87
Tabla 39: Especificaciones granulométricas según Administradora Boliviana de Carreteras	88
Tabla 40: requisitos de gradación para la mezcla (tolerancia).....	88
Tabla 41: Especificaciones Granulométricas Según La Norma ASTM D3515	89
Tabla 42: Designaciones Propuestas en la Metodología SUPERPAVE.....	89
Tabla 43: Combinación de Agregados Pétreos	90
Tabla 44: Especificación del Instituto de Asfalto	91
Tabla 45: Verificación De La Administradora Boliviana De Carreteras.....	92
Tabla 46: Verificación de la Granulometría Mediante la Norma ASTM D3515	93
Tabla 47: Verificación de la Granulometría – Especificación SUPERPAVE.....	93
Tabla 48: Combinación de Agregados Pétreos	94
Tabla 49: Temperaturas de Mezclado y Compactación.....	94
Tabla 50: Determinación de Cemento Asfáltico Para una Briqueta	95
Tabla 51: Cantidad de Briquetas Elaboradas	95
Tabla 52: Criterio de Diseño de Mezclas Marshall.	96
Tabla 53: Características de Tránsito Según el Tipo Tráfico	97
Tabla 54: Especificaciones de Diseño de Mezcla Marshall.....	101
Tabla 55: % Mínimo de Vacíos del Agregado Mineral	101
Tabla 56: Criterios de Diseño Para Zonas de Altura	102
Tabla 57: Datos Para las Gráficas Marshall.....	102
Tabla 58: Resultados de Criterios de Diseño	104
Tabla 59: Datos Para las Gráficas de Marshall de Asfalto Modificado.....	104
Tabla 60: Resultados de Criterios de Diseño del Asfalto Modificado.....	105
Tabla 61: Datos Para el Cálculo de Material Modificante.....	110
Tabla 62: Niveles de Presión Sonora.....	118
Tabla 63: Caracterización por Penetración del Cemento Asfáltico	123
Tabla 64: Caracterización del Asfalto Brasileño Modificado con Bumper (Óptimo)	123
Tabla 65: Caracterización del Cemento Asfáltico Original Ecopetrol de Procedencia Colombiana	124
Tabla 66: Caracterización del Asfalto Colombiano Ecopetrol Modificado (Óptimo).....	125
Tabla 67: Grados de Ligante Superpave	127
Tabla 68: resultados de diseño Marshall del asfalto Brasileño.....	128
Tabla 69: Resultados de Diseño Marshall del Cemento Asfáltico de Procedencia Colombiana	128

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Ensayo de Penetración.....	67
Gráfico 2: Ensayo de Ductilidad.....	70
Gráfico 3: Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola)	71
Gráfico 4: Pedida de Masa (Película Delgada)	75
Gráfico 5: Penetración (Película Delgada)	75
Gráfico 6: Punto de Ablandamiento (Película Delgada).....	75
Gráfico 7: Viscosidad Brookfield	78
Gráfico 8: Punto de Fragilidad Fraass	79
Gráfico 9: Ensayo de Penetración (Estabilidad al Almacenamiento).....	82
Gráfico 10: Punto de Ablandamiento (Estabilidad al Almacenamiento).....	82
Gráfico 11: Datos Para las Gráficas Marshall.....	103
Gráfico 12: Análisis y Comparación de Vacíos y Estabilidad del Asfalto Modificado	105
Gráfico 13: Análisis y Comparación de Flujo Marshall del Asfalto Modificado.....	106
Gráfico 14: Análisis de Diseño Marshall del Asfalto Original y Modificado	106
Gráfico 15: Análisis y Comparación Del Asfalto En Estudio De Procedencia Brasileña	126
Gráfico 16: Análisis y Comparación Técnica del Cemento Asfáltico de Procedencia Colombiana	126
Gráfico 17: Resultados del Diseño de Marshall del asfalto Brasileño.....	129
Gráfico 18: Comparación de Resultados de Diseño Marshall del Asfalto Colombiano.....	129
Gráfico 19: Resultado Comparativo de Ahuellamiento.....	133

RESUMEN

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Correo: elio.umsa@gmail.com

La construcción de una nueva carretera o vía conlleva un alto costo y a la vez los materiales a emplear deben cumplir las especificaciones establecidas en las normas correspondientes. En Bolivia en la última década, la construcción de carreteras incrementó considerablemente gracias al auge económico que se presenta, el problema de estas nuevas carreteras y vías son los prematuros desgastes de la capa asfáltica, deterioros, fisuras, baches, deformaciones, entre otras, a los meses de haber sido concluidas. Es por eso que se ha trabajado en mejorar las propiedades físico - mecánicas del asfalto convencional para nuestro medio con la incorporación de material de desecho proveniente de parachoques de vehículos (bumper). En el presente proyecto se realiza un análisis y comparación de mezclas asfálticas originales y modificadas con material ya mencionado anteriormente con el fin de contribuir a la reutilización de materiales de desecho y que sea una alternativa para quienes se dedican en la construcción de carreteras, además los materiales de desecho cada vez más se convierten en aliados en el aporte a la ciencia y tecnología, por la necesidad de la población de como reutilizarlos, el reciente suceso ocurrido en la ciudad de La Paz muestra la problemática no solo en nuestro país si no a nivel mundial en las grandes dificultades en la gestión de residuos y que está lejos de una solución.

Además, la necesidad de mejorar el asfalto convencional trajo en los últimos años en el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados que ha sido y es, una técnica ampliamente utilizada y estudiada para mejorar las propiedades físico - mecánicas y químicas del asfalto convencional para un buen desempeño de acuerdo a las exigencias y condiciones geográficas y climáticas de cada país.

La investigación del presente trabajo se fundamenta en la modificación del asfalto convencional con porcentajes de: 1.5% 2.0% 3.0% de material modificante por el proceso de vía húmeda y la caracterización de estas, y posterior verificación en la mezcla asfáltica empleando la metodología Marshall, determinando así el porcentaje idóneo de modificante, y el porcentaje óptimo del asfalto modificado en la mezcla asfáltica.

En el diseño de la mezcla asfáltica se realizaron los ensayos especificados en la metodología Marshall y finalmente se realizó el ensayo de ahuellamiento (ABC: A0 610) que mide la resistencia a la deformación, para el porcentaje óptimo de modificante y cemento asfáltico original obteniendo resultados favorables.

Se pudo determinar cuantitativamente que el material modificante, desecho proveniente de parachoques de vehículos (bumper) presenta un beneficio sobre el comportamiento del asfalto, y de la mezcla asfáltica principalmente aportando a la resistencia de deformación permanente, y la resistencia a bajas temperaturas, para zonas frías, el modificante no generó un efecto negativo en ninguno de los parámetros analizados.

Palabras Clave: Asfaltos Modificados, Mezcla Asfáltica, Deformación Permanente, Material Desecho, Vía Húmeda

ABSTRACT

**ANALYSIS AND EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF MODIFIED ASPHALT MIXTURES
WITH VEHICLE BUMPER MATERIAL (BUMPER)**

Email: elio.umsa@gmail.com

The construction of a new road or road entails a high cost and at the same time the materials to be used must comply with the specifications established in the corresponding standards. In Bolivia in the last decade, the construction of roads increased considerably thanks to the economic boom that arises, the problem of these new roads and roads are the premature wear of the asphalt layer, deterioration, cracks, potholes, deformations, among others, to the months of having been concluded. That is why it has been worked in improving the physical - mechanical properties of conventional asphalt for our environment with the incorporation of waste material from vehicle bumpers (bumper). In the present project an analysis and comparison of original and modified asphalt mixtures with material already mentioned above is carried out in order to contribute to the reuse of waste materials and that is an alternative for those who are engaged in road construction, in addition to Waste materials increasingly become allies in the contribution to science and technology, due to the need of the population how to reuse them, the recent event from La Paz city shows the problem not only in our country but also global level in the great difficulties in waste management and that is far from a solution.

In addition, the need to improve conventional asphalt brought in recent years in the world, the modified asphalt technology that has been and is, a technique widely used and studied to improve the physical - mechanical and chemical properties of conventional asphalt for a Good performance according to the geographical and climatic requirements and conditions of each country.

The investigation of the present work is based on the modification of the conventional asphalt with percentages: 1.5% 2.0% 3.0% of modifying material by the wet process and the characterization of these, and later verification in the asphalt mixture using the Marshall methodology, determining thus the ideal percentage of modifier, and the optimum percentage of the modified asphalt in the asphalt mixture.

In the design of the asphalt mixture, the tests specified in the Marshall methodology were carried out and finally, the test of compaction (ABC A0 610) that measures the resistance to deformation was performed, for the optimal percentage of modifier and original asphalt cement obtaining favorable results.

It was determined quantitatively that the modifying material, waste from vehicle bumpers (bumper) has a benefit on the behavior of asphalt, and the asphalt mixture mainly contributing to the permanent deformation resistance, and the resistance to low temperatures, for areas cold, the modifier did not generate a negative effect on any of the parameters analyzed.

Keywords: Modified Asphalts, Asphalt Mix, Permanent Deformation, Waste Material, Wet Way.

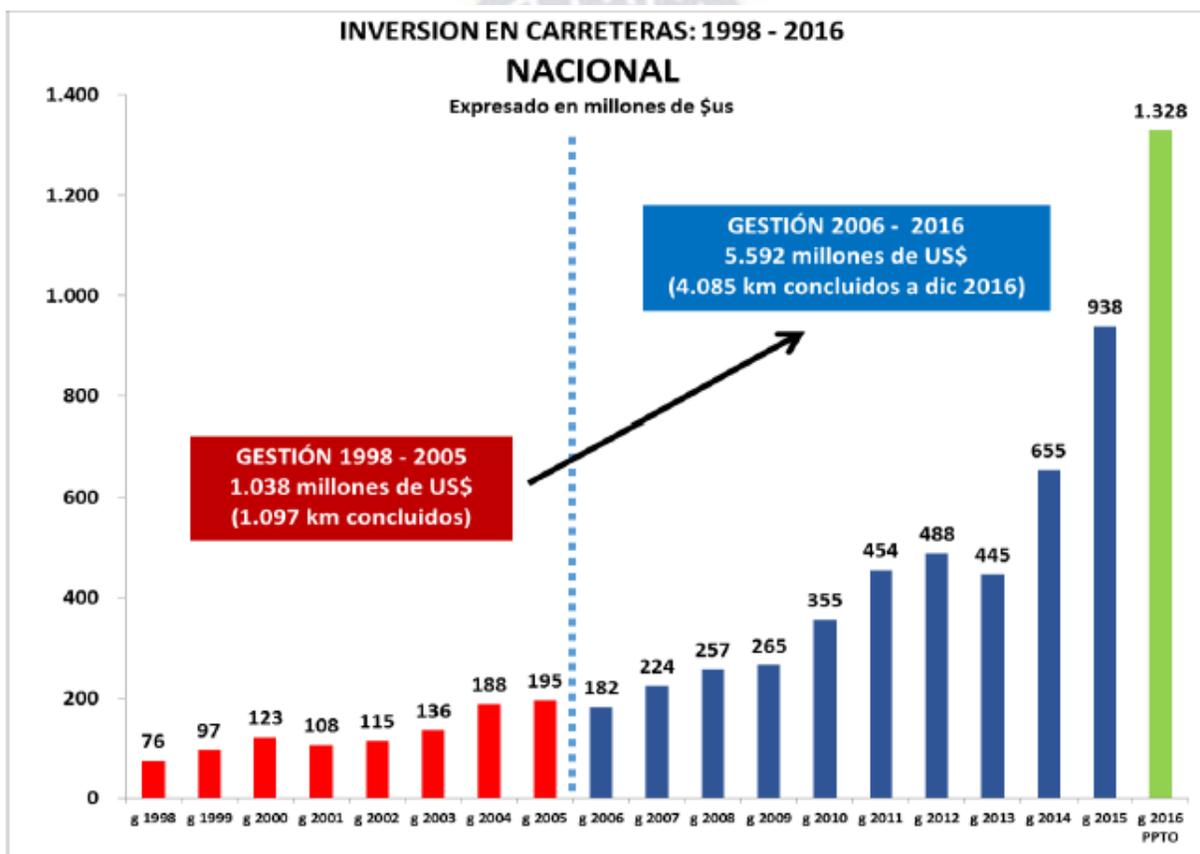
CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN
GENERAL

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN GENERAL

1.1 JUSTIFICACIÓN GENERAL

En la última década en Bolivia, la construcción de carreteras incrementó considerablemente gracias al auge económico que se presenta. El impacto que tiene la construcción de carreteras en nuestro país y en el mundo, es el progreso de la misma, que promueve el desarrollo de la economía, e integra ciudades, etc.

La Figura 1 muestra la construcción de carreteras fundamentales en nuestro país desde el año 1986 cuando se inició un proceso sostenido de construcción de carreteras pavimentadas, que se ha intensificado a partir del año 2006 destinando mayor presupuesto a la misma.



*La inversión consignada corresponde a la ejecución de inversión por año de todos los proyectos viales, tanto de construcción como de conservación y rehabilitación, tanto en las fases de preinversión como de inversión.

Figura 1: Inversión en carreteras 1998 – 2016

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

El cuadro siguiente, detalla los kilómetros concluidos entre las gestiones 2011 - 2015:

KILÓMETROS CONCLUIDOS			
GESTIÓN	PROG	EJEC	%
2011	518	222	43
2012	1.091	545	50%
2013	319	278	87%
2014	783	540	69%
2015	784	630	80%
PROMEDIO	699	443	63%
TOTAL	3.496	2.214	63%

Tabla 1: Kilómetros Concluidos 2011 – 2015

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

La tabla 2 muestra la planificación y el presupuesto para el quinquenio 2016 – 2020.

PROGRAMA / CORREDOR	CARRETERA	DOBLE VIA	PUENTE	REHABILITACION	TUNEL	TOTAL GENERAL
Dobles vías	-	996,16	-	-	-	996,16
Corredor Bioceánico	485,12	-	-	255,60	-	740,72
Corredor Norte – Sur	785,00	-	-	-	-	785,00
Corredor Oeste – Norte	1.879,52	-	-	-	-	1.879,52
Diagonal Jaime Mendoza	60,00	-	-	-	3,40	63,40
Conexiones de Capitales de Departamento	288,70	-	-	-	-	288,70
Integración de Regiones Productivas y la “Y” de la Integración	1.167,86	-	-	-	-	1.167,86
Puentes y accesos	-	-	7,27	-	-	7,27
Central - Sur	66,00	-	-	-	-	66,00
Total general	4.732,20	996,16	7,27	255,60	3,40	5.994,63

Tabla 2: Kilómetros Construidos 2016 – 2020 por Programa y Corredor

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

“En base al PDES (Plan de Desarrollo Económico y Social), al 2020 tendremos, entre carreteras y dobles vías construidas y reconstruidas, un total de 5.995 km nuevos de pavimento, que sumados a los 6.500 km pavimentados a la fecha, totalizan 12.095 km asfaltados de la RVF (Red Vial Fundamental)”. (ADMINISTRADORA BOLIVIANA DE CARRETERAS, 2016)

Se presenta la pavimentación de proyectos por departamento a continuación:

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

DEPARTAMENTO	CARRETERA	DOBLE VIA	PUENTE	REHABILITACION	TUNEL	TOTAL GENERAL
BENI	1.611,49	-	1,98	-	-	1.613,47
CHUQUISACA	60,00	23,75	-	-	3,40	87,15
COCHABAMBA	172,55	489,24	0,57	87,80	-	750,16
LA PAZ	902,19	200,00	0,90	-	-	1.103,09
ORURO	137,50	125,87	0,13	-	-	263,50
PANDO	500,43	-	0,58	-	-	501,01
POTOSI	214,97	-	-	-	-	214,97
SANTA CRUZ	1.035,07	157,30	1,74	167,80	-	1.361,91
TARIJA	98,00	-	-	-	-	98,00
MULTIDEPARTAMENTAL	-	-	1,37	-	-	0,37
Total General	4.732,20	996,16	7,27	255,60	3,40	5.994,63

Tabla 3: Kilómetros Construidos 2016 – 2020 por Departamento

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

En la tabla 4 se presenta las inversiones que se ejecutarán en todos los proyectos que ejecuta la ABC, asignados por año, por departamento y por corredores. Se señala que el siguiente presupuesto se avoca netamente a la inversión, es decir no se incluye el gasto corriente necesario para la entidad.

N	Programa	LINEA BASE AL 2015 EN \$US	2016 \$US	2017 \$US	2018 \$US	2019 \$US	2020 \$US	TOTAL \$US 2016 - 2020
1	Doble Vía	76.679.448	313.822.102	599.048.371	887.986.670	908.703.409	418.560.000	3.128.120.552
2	Bioceánico	57.890.211	143.627.184	150.443.731	149.287.522	178.945.000	124.810.000	747.113.437
3	Norte - Sur	-	-	162.290.000	486.870.000	649.160.000	324.580.000	1.622.900.000
4	Oeste - Norte	23.609.014	175.690.119	589.132.623	1.054.496.407	1.120.125.144	544.246.694	3.483.690.986
5	Diagonal Jaime Mendoza	-	-	16.800.000	50.400.000	67.200.000	33.600.000	168.000.000
6	Conexión Capitales Departamentos	-	36.199.999	104.744.999	179.229.999	164.515.000	122.210.000	606.899.996
7	Integ. Reg. Prod. y "Y" de la Integración	128.313.703	97.550.818	229.954.043	474.265.478	516.465.957	241.250.000	1.559.486.297
8	Puentes y accesos	19.354.000	62.996.200	67.495.300	67.616.500	63.668.000	30.130.000	291.906.000
9	Central - Sur	9.240.000	31.920.000	21.000.000	21.840.000	-	-	74.760.000
TOTAL GENERAL		315.086.376	861.806.422	1.940.909.067	3.371.992.576	3.668.782.510	1.839.386.694	11.682.877.269

Tabla 4: Inversión Total 2016 – 2020 por Corredor (Expresado en dólares estadounidenses)

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

Mapa 1. Tramos carreteros y dobles vías

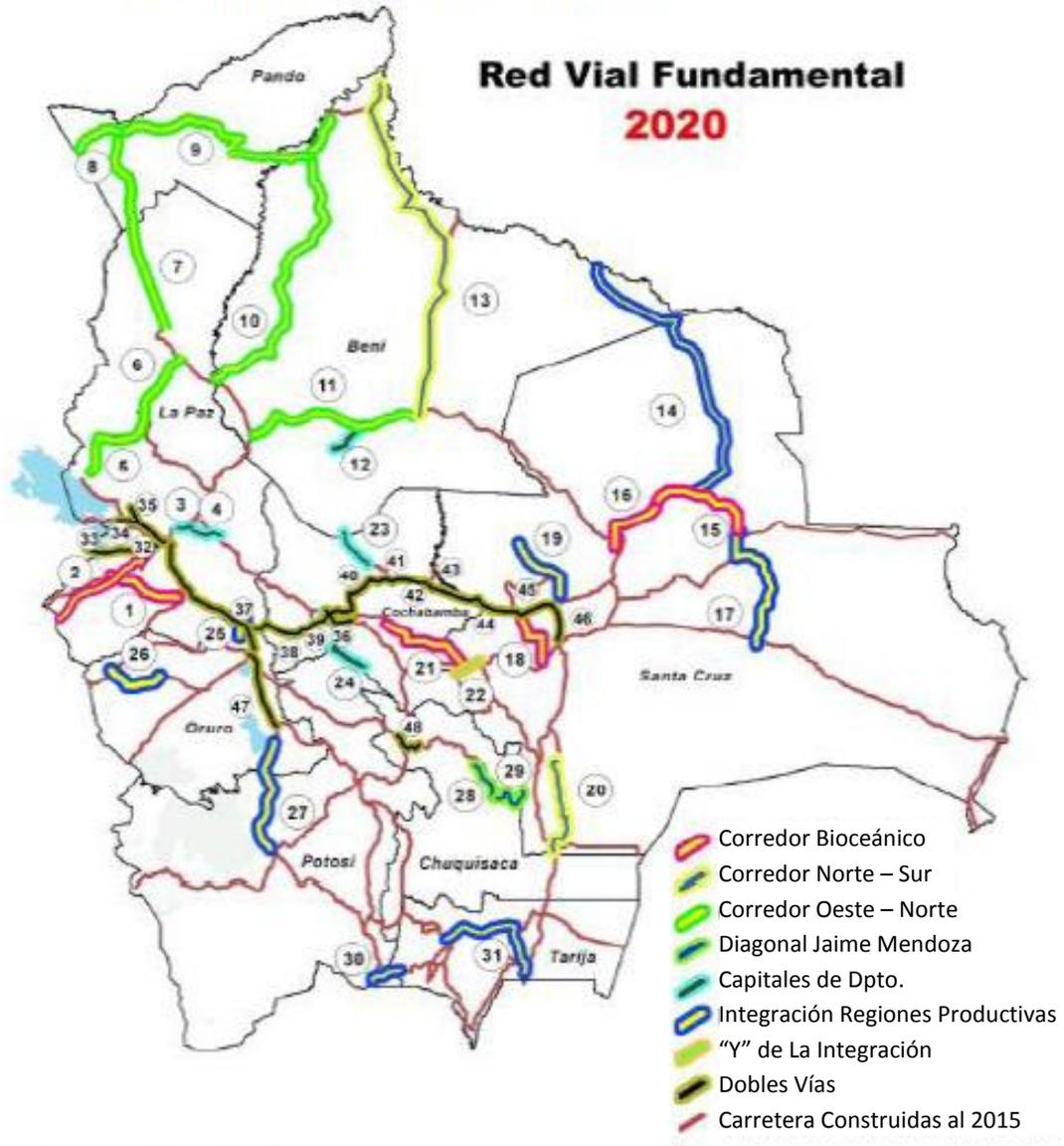


Figura 2: Red Vial Fundamental 2020

Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras

Bolivia hace fuertes inversiones en el transporte tal como se observa en los cuadros anteriores, se destinan millones de dólares en las construcciones de carreteras fundamentales.

Si bien la construcción de carreteras incrementó actualmente, las mismas presentan prematuros desgastes de la capa asfáltica, deterioros, fisuras, baches, deformaciones, entre otras, a los meses de haber sido concluidas, caso de la carretera doble vía LAPAZ- ORURO, estos pueden ser por varios factores.

Las siguientes imágenes muestran el deterioro de las carreteras:



Figura 3: Carretera Yucumo – Quiquibey

Fuente: <https://www.paginasiete.bp/nacional/2017/4/11/denuncian-carretera-construida-corsan-esta-deteriorada-meses-entrega-133914.html>



Figura 4: Doble vía La Paz - Oruro

Fuente: foto de archivo (internet)

La carretera La Paz - Oruro fue catalogada como la más cara del mundo (según un artículo firmado por Gorka Ramos, publicado en febrero de 2015), el cual ya presenta deterioros, prematuro desgaste de la carpeta asfáltica que se atribuyó a varios factores, como temperaturas extremas e incremento del tráfico pesado.

Son algunas carreteras de muchas que se encuentran en mal estado en nuestro país.

Existe en nuestro país una variación climática, especialmente en el altiplano como ser la radiación solar, temperatura, humedad, nevadas, entre otros, factores por las que se manifiestan patologías en el pavimento, sin dejar de mencionar el exceso de carga, falta de control en la ejecución de proyectos carreteros y muchos otros problemas.

La ubicación geográfica del país, permite comprender una gran variedad de formas de relieve y climas. En Bolivia existe una amplia biodiversidad, así como las distintas eco regiones y sub unidades ecológicas como el altiplano, la llanura amazónica, los valles secos, los yungas y las serranías Chiquitanas que están enmarcadas en variaciones altitudinales diversas que van desde los 70 msnm cerca del río Paraguay hasta los 6542 msnm del nevado Sajama. En los cuales las temperaturas que se registran van desde los grados centígrados bajo cero hasta los 45 grados centígrados, este último se registró en el chaco.

Para cada una de las regiones de nuestro país, es necesario distintas especificaciones para pavimentación, y el tipo del asfalto, para un mejor desempeño de la misma, por las condiciones geográficas, climatológicas, etc. que presenta cada región.

Una mala ejecución de carretera trae:

- ❖ Superficie de rodado de baja funcionalidad (serviciabilidad) lo que conlleva a vías con relativos altos costos operacionales.
- ❖ Superficie de rodado que presentan restricciones para ser utilizadas en todas las estaciones del año.
- ❖ Superficie de rodado que requieren una frecuencia relativamente alta de conservación.

Actualmente la construcción con asfaltos modificados es común y frecuente, para mejorar las características mecánicas de estos: es decir reducen su resistencia a la deformación por factores climatológicos y del tránsito, agrietamientos, etc. para un aprovechamiento efectivo del asfalto en la pavimentación de vías.

Una técnica utilizada es la modificación del asfalto que cada vez es más común para mejorar las propiedades del cemento asfáltico convencional.

Con la modificación se busca mejorar las características físico - mecánicas del asfalto como la viscosidad a temperaturas elevadas, la disminución de fisuras por efecto térmico y por la fatiga, y ligantes con mejores características adhesivas, etc.

En el ámbito ambiental a lo largo de nuestros días, en los últimos años se habla de calentamiento global y el reciclaje, la contaminación al medio ambiente.

Es por esta razón que muchos investigadores a lo largo de estos años investigan de cómo aprovechar los materiales de desecho y que estas puedan volverse amigables en temas de

investigación y así aportar a la mitigación, de la contaminación que sufre nuestro planeta, ya que el control de desechos es complejo, provocando en muchos casos que estos materiales sean descartados de maneras no adecuadas para con el medio ambiente.

Es por eso que se ha trabajado con un material de desecho como posible modificador de asfalto.

1.2 FINES

Mejorar las características físico - mecánicas del asfalto convencional ECOPETROL 60/70 de procedencia colombiana con la incorporación de desecho de parachoques de vehículos (bumper) como modificador en mezclas asfálticas en caliente. Realizando una comparación técnica mediante ensayos de laboratorio al asfalto original y modificado determinando de ésta última la dosificación y el porcentaje idóneo de modificador a utilizar y la reutilización del desecho.

Generar información y aportar al conocimiento en dos aspectos importantes que son: convertir en aliados a los desechos en la investigación, para mejorar las características de asfaltos convencionales con la modificación, obtener un cemento asfáltico con mejores propiedades para las condiciones y exigencias de nuestro medio, y que sea una alternativa útil a quienes se dedican en la construcción de carreteras.

1.3 ESTADO DEL ARTE

La necesidad de mejorar el asfalto convencional trajo en los últimos años en el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados que ha sido y es, una técnica ampliamente utilizada y estudiada para mejorar las propiedades físico - mecánicas y químicas del asfalto convencional para un buen desempeño de acuerdo a las exigencias y condiciones geográficas y climáticas de cada país.

Actualmente la modificación del asfalto ya no es una técnica nueva porque se viene empleando en la elaboración de pavimentos flexibles, asfaltos modificados desde hace más de 30 años, en una primera instancia con la adición de polímeros tipo elastómero y plastómeros.

De los cuales se consiguió buenos resultados, se puede decir en términos generales, “los asfaltos modificados con polímeros mejoran sus propiedades, como menor susceptibilidad a la temperatura, mayor intervalo de plasticidad, mayor cohesión, mejor respuesta elástica, al igual que mayor resistencia al agua y al envejecimiento” (Heshmat, 1995).

Los modificadores aumentan la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y a los esfuerzos de tensión repetidos, por lo tanto, a la fatiga; además, reducen el agrietamiento, así como la susceptibilidad de las capas asfálticas a las variaciones de temperatura. Estos modificadores, por lo general, se aplican directamente al material asfáltico antes de mezclarlos con el material pétreo (Heshmat, 1995).

En nuestro país los asfaltos modificados se implementaron en el altiplano boliviano, tal solución se implementó en la construcción del tramo Guaquí – Desaguadero el año 2001 teniendo una duración de la misma hasta el año 2013. De acuerdo al proyecto de grado del Ing. Carlos Rojas sobre la recuperación y análisis de cementos asfálticos modificados con polímeros utilizados en dicho tramo concluye que después de cuatro años la carpeta asfáltica presenta pequeñas muestras de deterioro y la misma mantenía sus propiedades y que la pérdida de elasticidad no era apreciable.

Posteriormente se implementaron asfaltos modificados de Perú, Brasil y Colombia modificados con polímero estos proyectos no presentaron deterioros (fisuración) hasta los 5 años, como el proyecto Potosí – Uyuni.

Se realizaron investigaciones para zonas de altura, sobre los factores que afectan al pavimento flexible, una de ellas es del Ing. Pablo del Águila Rodríguez en una investigación de: “Experiencias sobre el diseño y criterios para la construcción de pavimentos en zonas de altura presentada” al 10° Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, Sevilla, noviembre 1999. Donde indica los factores que afectan a los pavimentos en las zonas de altura entre las que encuentran está las temperaturas bajas, gradiente térmico, radiación solar intensa, y los efectos de flujos de agua superficial y subterránea.

- ❖ Las temperaturas bajas afectan las propiedades reológicas del asfalto y en consecuencia las propiedades físicas de las mezclas, por lo tanto, en las capas asfálticas se originan fisuramientos debido al incremento de la rigidez y/o por contracción térmica combinada con acción del tráfico pesado.
- ❖ Un fenómeno típico que se produce en las zonas de altura es el gradiente térmico que genera cambios volumétricos a diario en el interior de la capa asfáltica produciendo esfuerzos cíclicos de tracción y compresión que derivan a su falla por fatiga.
- ❖ Otro de los problemas, es la radiación solar severa que se produce en las zonas de altura, promoviendo la evaporación de fracciones blandas del asfalto como el aceite (le da al asfalto la propiedad de elasticidad), creando un ambiente propicio para la oxidación y envejecimiento de las estructuras asfálticas. Los efectos de la radiación solar, son la decoloración inmediata de la superficie asfáltica, la pérdida del material fino de la mezcla (peladuras) y el incremento la permeabilidad de la capa.
- ❖ El agua superficial también contribuye a la oxidación del asfalto, al ingresar por los vacíos de la capa de rodadura. Sin embargo, su mayor efecto destructivo se manifiesta en forma combinada con las cargas de tráfico, ya que el agua alojada en las fisuras del pavimento, por efecto de la presión de los neumáticos, genera una presión de poros que gradualmente destruye el pavimento asfáltico.
- ❖ La presencia del agua subterránea es negativa para los suelos finos en una carpeta asfáltica, porque son susceptibles al congelamiento, provocando el hinchamiento de los

mismos y de las capas granulares del pavimento, generando la aparición de deformaciones permanentes y el fisuramiento de las capas asfálticas.

La combinación de estos factores contribuye en capas asfálticas al deterioro prematuro y acelerado provocando manifestaciones patológicas desde el micro-fisuramiento, y/o piel de cocodrilo.

Considerando la tecnología actual respecto a la calificación del bitumen en función a su performance y la calidad de los materiales asfálticos disponibles para la construcción de los pavimentos, la solución al problema de los fisuramientos térmicos de las estructuras asfálticas, trabajando en climas fríos y zonas de altura, se encuentra en utilizar un ligante asfáltico modificado que permita obtener una mezcla capaz de mantenerse flexible y elástica a la temperatura más baja prevista para su vida en servicio, y con una mejor resistencia a la fatiga y al envejecimiento (Del Águila Rodríguez, 1999).

Existe a nivel mundial una problemática cada vez más seria y radica en las grandes dificultades en la gestión de los residuos no biodegradables que provienen de la Industria.

Países como Colombia y Costa Rica vienen investigando la incorporación como modificante los materiales de desechos como el caucho, plásticos, polietileno, ceras, aceites reciclados, etc. es así que debido a las políticas de los países, cada vez más los desechos se vuelven en aliados para el aporte de la ciencia y tecnología, debido a una creciente preocupación de la ciudadanía por analizar como reutilizarlos y reciclarlos.

Costa Rica que posee el 5% de la biodiversidad del mundo, ve la necesidad de salvaguardar ésta, porque la biodiversidad hace una industria turística masiva y rentable. En uno de sus artículos de investigación con materiales de desecho como ser el bumper de automóviles, el polipropileno y polietileno para el empaque de banano señala: “Considerando que la modificación de asfaltos es una práctica cada vez más común, es de interés identificar si la modificación puede ser realizada mediante el uso de materiales que pueden presentar un impacto ambiental severo debido a razones como contaminación o dificultad de desecho” (Villegas, Aguiar, & Loria, 2018).

Bolivia, que alberga una de las más grandes biodiversidades del mundo, hace que sea necesario incursionar en la eliminación o reutilización de desechos, convirtiendo estos en aliados en la investigación como lo fueron haciendo países vecinos y como fue incursionando Bolivia en estas investigaciones a través de la Universidad Mayor de San Andrés como, las botellas pet, bolsas plásticas, el caucho biosulfurado, aceites en desuso del pumakatari, etc. ahora se estudia el material de desecho proveniente de parachoques de automóviles (bumper), como modificante en mezclas asfálticas en caliente para nuestro medio. Con ésta investigación se pretende dar un mejor uso, para así, evitar su degradación y reducir las emisiones de gases contaminantes, además por incremento del parque automotor que sufre nuestro país en los últimos años.

1.4 OBJETIVO GENERAL

- ❖ Realizar un análisis y evaluación del comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con material proveniente de parachoques de vehículos (bumper).

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Modificar el cemento asfalto convencional, Ecopetrol 60/70 Colombiano, con la incorporación de material de desecho, proveniente de parachoques de automóviles (bumper) como modificante.
- ❖ Realizar la caracterización del cemento asfáltico convencional y modificado mediante los ensayos especificados en normas ASTM y AASHTO.
- ❖ Realizar la dosificación para los distintos porcentajes de asfalto modificado.
- ❖ Determinar el contenido mínimo idóneo de modificante en la mezcla asfáltica, mediante el diseño del método Marshall, así como el contenido del porcentaje de asfalto modificado en el diseño de la mezcla asfáltica en caliente.
- ❖ Efectuar un análisis técnico comparativo de los resultados obtenidos en laboratorio.
- ❖ Realizar el ensayo de ahuellamiento del cemento asfáltico convencional y del porcentaje óptimo de modificante en la mezcla asfáltica.
- ❖ Efectuar un análisis comparativo del comportamiento, de la modificación de dos asfaltos, de procedencia colombiana realizado en el presente proyecto, y con el cemento asfáltico brasileño realizado en el proyecto de grado del Univ. Gonzales Saavedra Miguel Angel.

1.6 ALCANCE DEL PROYECTO

El presente proyecto se enfoca en la modificación del asfalto convencional para nuestro medio con la incorporación de material de desecho proveniente de parachoques de automóviles (bumper), como modificante en mezclas asfálticas en caliente.

El cemento asfáltico a utilizar en el proyecto es Ecopetrol 60/70 convencional de procedencia Colombiana, y una variable independiente será el agregado a utilizarse.

Para el diseño de mezcla asfáltica se utilizará el método Marshall, el cual nos permitirá realizar un análisis comparativo y técnico de las diferentes alternativas. Posterior a ello se elegirá la dosificación óptima, y se obtendrá los datos del comportamiento e influencia de la modificación con desecho de parachoques de automóviles (bumper) en la mezcla asfáltica en caliente, con la comparación de los resultados y la caracterización del cemento asfáltico en estudio.

1.7 METODOLOGÍA

La metodología para el presente trabajo es experimental descriptiva, mediante la realización de ensayos en laboratorio de la siguiente forma:

1ra ETAPA:

- ❖ Recopilación de información referente al tema.
- ❖ Selección de material.
- ❖ Caracterización de los materiales.
- ❖ Ensayos de laboratorio para agregados y cemento asfáltico.

2da ETAPA:

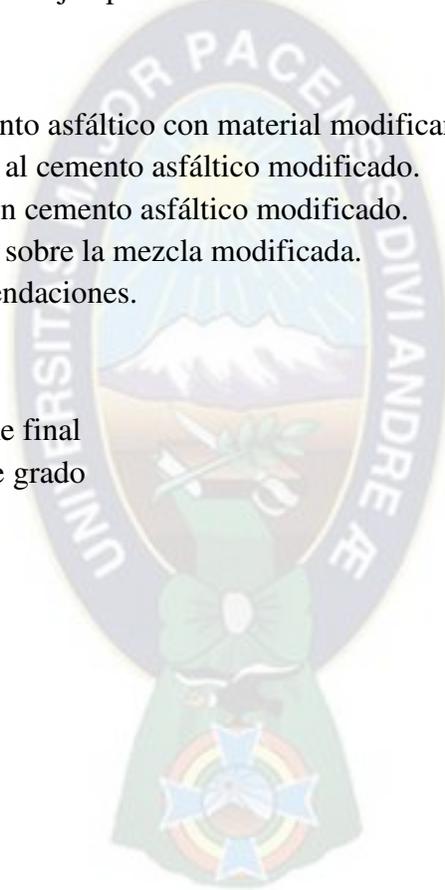
- ❖ Diseño y ensayos de laboratorio sobre la mezcla convencional.
- ❖ Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

3ra ETAPA:

- ❖ Modificación del cemento asfáltico con material modificante.
- ❖ Ensayos de laboratorio al cemento asfáltico modificado.
- ❖ Diseño de la mezcla con cemento asfáltico modificado.
- ❖ Ensayos de laboratorio sobre la mezcla modificada.
- ❖ Conclusiones y recomendaciones.

4ta ETAPA:

- ❖ Presentación de informe final
- ❖ Defensa de proyecto de grado





CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2 CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 CEMENTOS ASFÁLTICOS

2.1.1 GENERALIDADES

Los productos utilizados en la pavimentación provienen de la destilación del petróleo crudo, ya sea esta de forma natural o industrial. Estos materiales ligan el agregado pétreo para conformar mezclas asfálticas y son los responsables de brindar, a la capa asfáltica, resistencia mecánica bajo carga monotónica, estática y/o cíclica, impermeabilidad y durabilidad (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

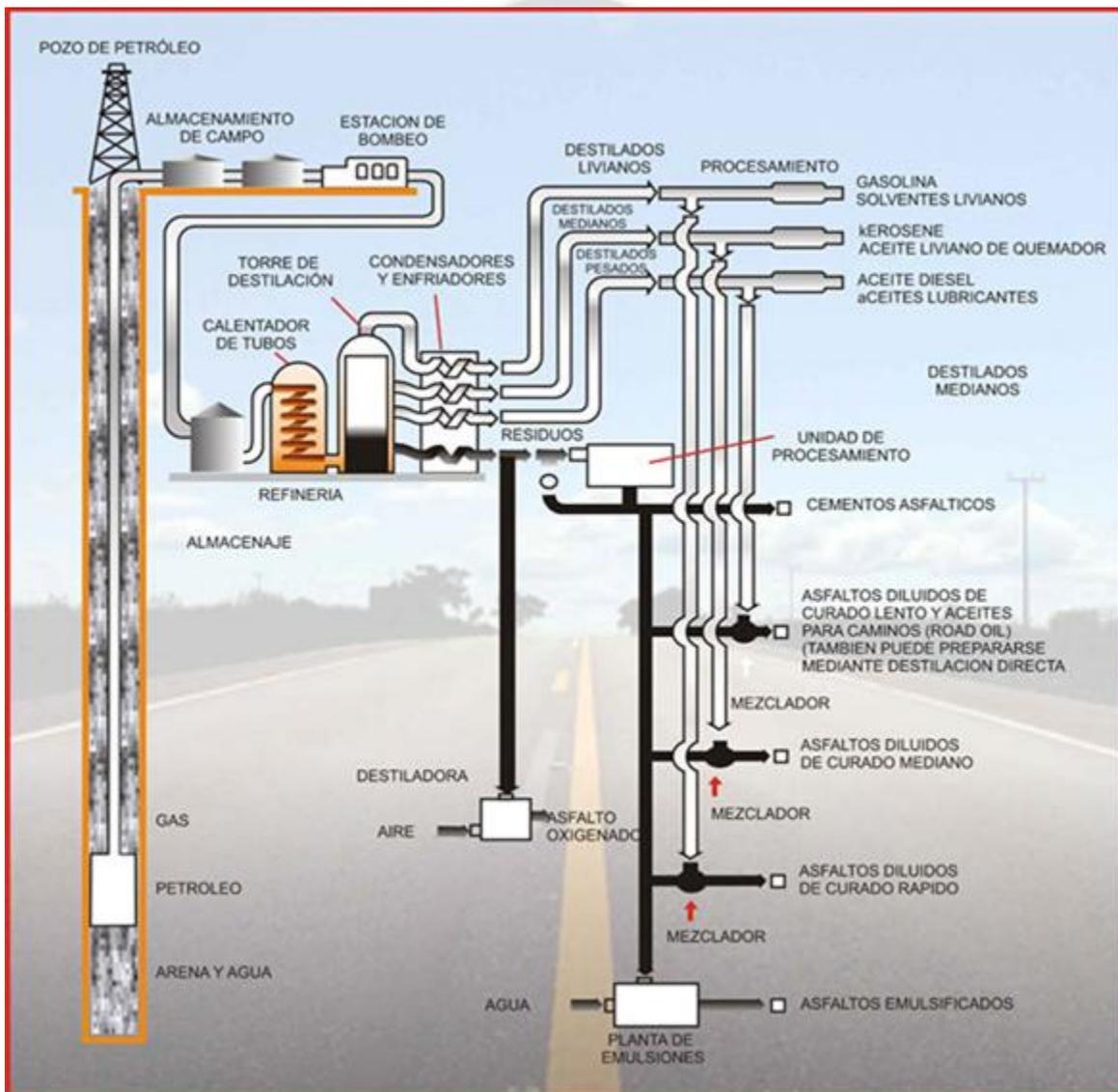


Figura 5: Esquema de la Fabricación de los Productos Asfálticos

Fuente: ingenieriadepetroleo.com - MERCADO DE ASFALTO EN PERU

Sin duda el asfalto es uno de los materiales más antiguos utilizados por el hombre. Excavaciones arqueológicas revelan de su empleo en épocas anteriores a nuestra era, en Mesopotamia, Asia, el asfalto era usado como aglutinante en trabajos de albañilería, en construcción de carreteras, capas de impermeabilización de depósitos de agua, y construcción de estrados.

El ingeniero Fernando Caballero Hoyos menciona en su manual de ensayos de laboratorio – IEM (Caballero Hoyos, 1998), que en Bolivia en la década de 1950 se construye por primera vez el pavimento asfáltico en la carretera Cochabamba – Santa Cruz y El Ato – Rio Seco. Actualmente en el país todo el producto que se utiliza proviene del exterior.

2.1.2 DEFINICIÓN

Los asfaltos son materiales que pueden encontrarse de consistencias solidas semisólidas o líquidas, con la temperatura estas se licuan, su color varía de negro a pardo oscuro, y cuyas propiedades físicas y químicas lo hace para múltiples aplicaciones de diversos tipos.

La *American Society for Testig and Materials* (ASTM) define al asfalto como un material ligante de color marrón oscuro a negro, constituido, principalmente, por betunes que pueden ser naturales u obtenidos por refinación del petróleo. El asfalto se presenta en proporciones variables en la mayoría de los petróleos crudos.

Por su comportamiento termoplástico, facilita la apropiada manipulación cuando se calienta y estas ligan con el agregado pétreo para la aplicación en pavimentos en la conformación de mezclas asfálticas, y por simple enfriamiento, retorna a sus propiedades visco elásticas que corresponden a las condiciones de servicio de una carpeta asfáltica, que a la vez impermeabilizan la estructura del mismo, evitando la penetración de agua de lluvia a las capas de base y sub base de la carretera.

2.1.3 COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES QUÍMICAS DEL ASFALTO

La composición química de los asfaltos es muy compleja, porque están constituidos fundamentalmente por una mezcla compleja de hidrocarburos, a lo largo de los años se fueron estudiando estas propiedades de los asfaltos. Básicamente están formados por cadenas de moléculas compuestas principalmente por carbono, hidrógeno, y en menor proporción el azufre, oxígeno, nitrógeno y complejos de vanadio níquel, hierro, calcio y magnesio.

El análisis químico del asfalto es muy laborioso, por la complejidad de esta, investigadores elaboraron métodos en el fraccionamiento de la composición del cemento, sin embargo con el pasar de los años se fueron creando equipos como el Sara con el cual se puede realizar cromatografía a estos materiales, y es posible distinguir dos grandes grupos que lo constituyen: los asfaltenos y maltenos que se clasifica en resinas y aceites.

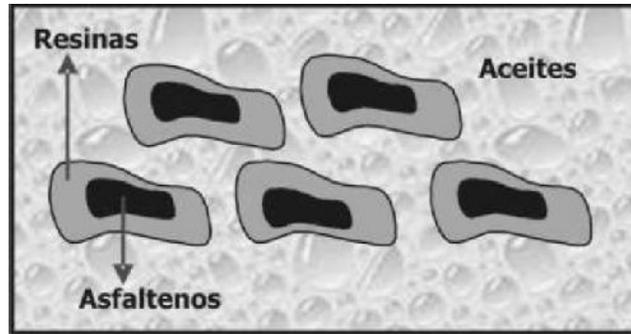


Figura 6: Composición del Asfalto

Fuente: Ventajas y Desventajas del Uso de Polímeros – TESIS.

Asfaltenos: son compuestos de alta viscosidad que le dan al asfalto elasticidad y resistencia, su color y dureza, estos son solubles en tricloroetileno, xilol entre otros solventes e insolubles en N-heptano.

Maltenos: Son líquidos viscosos compuestos de resinas y aceites. Las resinas son, por lo general, líquidos pesados de color ámbar o pardo oscuro, que proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites son de color más claro y estos actúan como un medio de transporte para los asfaltenos y las resinas. Los maltenos se disuelven en el heptano.

La proporción de asfaltenos y maltenos en el asfalto puede variar debido a un sin número de factores.

Los métodos de separación de cemento asfáltico a través de solventes se fueron mejorando y perfeccionando a lo largo de los años el cual se divide en dos:

2.1.3.1 MÉTODO DE FRACCIONAMIENTO CON SOLVENTE

A principios del siglo XX Richardson logró separar el asfalto en dos fracciones, mediante nafta 88-B, denominando asfaltenos a la fracción insoluble y maltenos a la fracción soluble, este método fue mejorado usando N-pentano para separar asfaltenos, Hoiberg – Hougen y Zapata más tarde lograrían separar los asfaltos en tres fracciones, asfaltenos - resina y aceites siendo Grevis el primer investigador en utilizar N- hexano, Traxler y Schwayer simplifican la técnica utilizada quien más tarde modifica el método separando el asfalto en 4 fracciones con n-pentano; esta técnica fue continuada por Knowles.

2.1.3.2 MÉTODO DE SEPARACIÓN CROMATOGRAFÍA

Con sílica gel se dividió los maltenos en dos fracciones y más tarde se separó estas en tres fracciones.

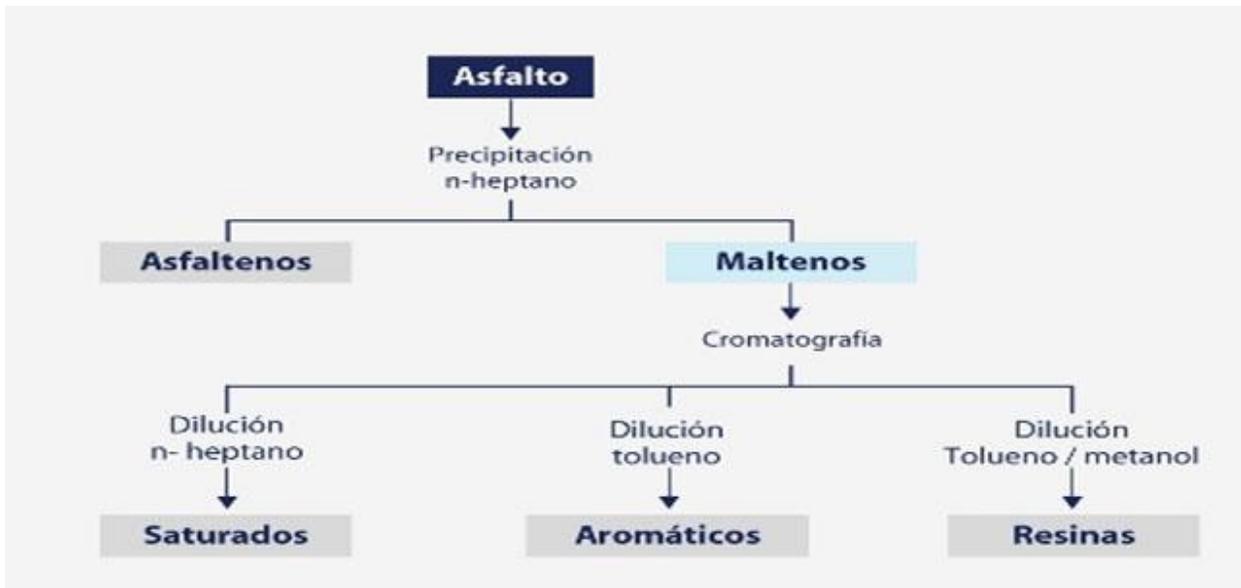


Figura 7: Composición del Asfalto con la Técnica Combinada de Separación

Fuente: <http://www.solpetroleo.com/fisico-quimica-del-asfalto>

Otros investigadores realizaron técnicas combinadas de separación, técnica que fue perfeccionada por Corbett en los años setenta, obteniéndose el método de fraccionamiento por solventes de adsorción – desorción selectiva de Corbett (ASTM D 4124).

2.1.4 PROPIEDADES FÍSICAS DEL ASFALTO

Las propiedades físicas del asfalto, de mayor importancia para el diseño, construcción, y mantenimiento de carreteras son: durabilidad, adhesión y cohesión, susceptibilidad a la temperatura, envejecimiento y endurecimiento.

Durabilidad. Es la medida de que tanto puede retener sus características originales un asfalto cuando es expuesto a procesos normales de degradación y envejecimiento. Es una propiedad juzgada principalmente a través del comportamiento del pavimento, el cual está afectado por el diseño de la mezcla, las características del agregado, la mano de obra en la construcción, y otras variables, que incluyen la misma durabilidad del asfalto. Pero con pruebas rutinarias como la Película delgada en Horno (TFO) y la Prueba de Película Delgada en Horno Rotatorio (RTFO), se puede evaluar el comportamiento de los cementos asfálticos.

Adhesión y Cohesión. Adhesión es la capacidad del asfalto para adherirse al agregado en la mezcla de pavimentación y la cohesión la de mantener firmemente, en su puesto, las partículas de agregado en el pavimento terminado.

El ensayo de ductilidad no mide directamente la adhesión o la cohesión; más bien, examina una propiedad del asfalto considerada por algunos, como relacionada con la adhesión y la cohesión.

En consecuencia, el ensayo es del tipo “califica – no califica”, y solo puede indicar si la muestra es, o no, lo suficiente dúctil para cumplir con los requisitos mínimos. (Asphalt Institute, 1992).

Susceptibilidad a la temperatura. Todos los asfaltos son termoplásticos, es decir, se vuelven duros (más viscosos) a medida que su temperatura disminuye, y más blandos (menos viscosos) a medida que su temperatura aumenta, esta característica se conoce como susceptibilidad a la temperatura, y es una de las propiedades más valiosas en un asfalto, pues nos indica la temperatura de mezclado y compactado sobre la base de una carretera. Es primordial conocer las características de viscosidad de un asfalto en todo el rango de temperatura. Estas deben tener suficiente fluidez a altas temperaturas para que pueda cubrir las partículas de agregado durante el mezclado, y así permitir que estas partículas se desplacen unas respecto a otras durante la compactación. Luego deberá volverse lo suficiente viscoso, a temperaturas ambientales normales, para mantener unidas las partículas de agregado.

El comportamiento del asfalto a altas y bajas temperaturas se da de la siguiente manera:

El cemento asfáltico expuesto a temperaturas extremadamente calurosas, como los desiertos, o a condiciones de velocidad y cargas sostenidas, como un tráiler a velocidad lenta, puede comportarse como un líquido viscoso, por esta razón se lo considera un fluido newtoniano, puesto que hay una conducta lineal entre la fuerza de resistencia y la velocidad relativa.

En el caso contrario, es decir cuando el asfalto es expuesto a temperaturas extremadamente bajas, o al ser expuesto al tráfico pesado a una alta velocidad generando cargas repetitivas, tiende a comportarse como un sólido “elástico”, contrario a los líquidos “plásticos”, y con la diferencia de que estos tienen la capacidad para recuperar su forma original una vez que la carga se ha desplazado, pero si excede la capacidad de carga, este no se expandirá y simplemente se fracturará.

Endurecimiento y envejecimiento. Los asfaltos tienden a endurecerse aumentando sus características de consistencia en la mezcla asfáltica durante la construcción, y también en el pavimento terminado. El cual es causado principalmente por el proceso de oxidación (el asfalto combinándose con el oxígeno), que ocurre fácilmente a altas temperaturas (como las temperaturas de construcción). En la elaboración de la mezcla asfáltica, el asfalto se encuentra a altas temperaturas y en películas delgadas mientras esta revistiendo las partículas de agregado durante el mezclado. Esto hace que la oxidación y el endurecimiento más severo ocurran en esta etapa de mezclado. El margen de viscosidad del material original (antes de la Prueba de Película Delgada en Horno rotatorio – RTFO) es mucho menor que el margen obtenido después del calentamiento.

La siguiente figura muestra el aumento en viscosidad debido al calentamiento de una película delgada de asfalto.

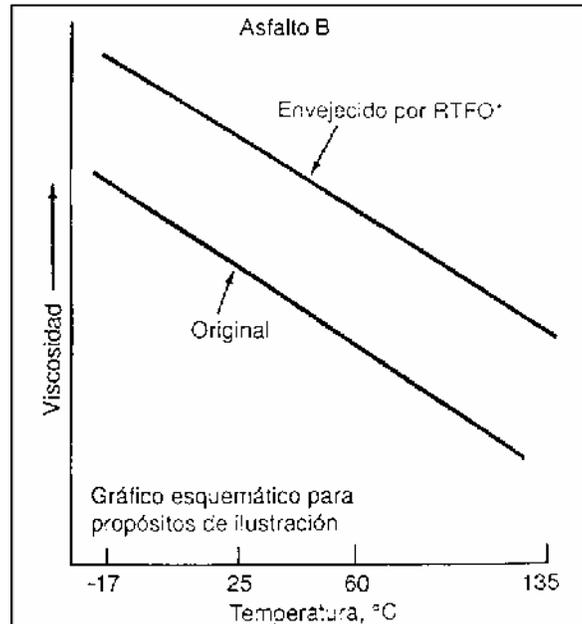


Figura 8: Aumento de Viscosidad Debido al Calentamiento de una Película Delgada del Asfalto

Fuente: Informe final del Proyecto con Recursos IDH: “Implementación de equipo para la evaluación de cementos asfálticos empleados en la pavimentación de carreteras en el altiplano boliviano a través de la propiedad de la viscosidad”.

Para minimizar el endurecimiento, a cada asfalto se debe realizar el ensayo por separado para así determinar sus características de envejecimiento. Estos ajustes incluyen mezclar el agregado con el asfalto a temperatura más baja posible para evitar la oxidación y en la práctica en el tiempo más corto posible.

2.1.5 PROPIEDADES REOLÓGICAS DEL ASFALTO

La Reología es la rama de la Física que estudia las propiedades del flujo y deformación de la materia, como la viscosidad, elasticidad, ductilidad, fragilidad, etc.

El estudio de las propiedades del ligante asfáltico es complejo por la misma estructura coloidal que presenta este. Que tiene mayor dificultad por ser termoplástico, es decir su propiedad de ablandarse y hacerse deformables por efecto del calor, recuperando al enfriarse sus propiedades primitivas, es el que ha hecho posible el empleo del asfalto como ligante desde la más remota antigüedad, razón por la cual es complejo el estudio de sus propiedades reológicas, pues todas deben estudiarse en general como funciones de la temperatura representadas por curvas más o menos complicadas.

Se realiza una descripción de algunas propiedades reológicas fundamentales del cemento asfáltico, a continuación:

Viscosidad.

Se define la resistencia al flujo debido a la fricción interna de un fluido, causada por atracción molecular. Para el cemento asfáltico es función de su temperatura, por lo que su determinación a diferentes temperaturas contribuye a la estimación de la susceptibilidad térmica. A mayor fricción, mayor es la cantidad de fuerza requerida para causar este movimiento, la cual es denominada fuerza de corte.

Típicamente las temperaturas para los ensayos que estiman la viscosidad se especifican a 60°C viscosidad dinámica y 135°C que es la viscosidad cinemática con la finalidad de proporcionar valores límites de consistencia.

Punto de reblandecimiento.

El Punto de reblandecimiento mide la temperatura del asfalto cuando esta tiene una consistencia determinada. Existen ensayos para determinar estas temperaturas como: Punto de ablandamiento anillo y bola, Punto de reblandecimiento Kramer - Sarnow y Punto de gota Ubbelohde. Estos ensayos son esencialmente ensayos de resistencia a la deformación.

En la práctica, el punto de reblandecimiento da una buena referencia de cuál es la susceptibilidad térmica de un asfalto.

Consistencia.

Este ensayo usualmente empleado para la determinación de las propiedades de fluencia de los productos asfálticos de viscosidad muy elevada es el de penetración.

El ensayo de penetración (ASTM D5/AASHTO T 49) obtiene empíricamente un parámetro de la consistencia del cemento asfáltico, en función de la distancia que logra penetrar una aguja estandarizada bajo una carga y tiempo especificado. La medida de la penetración es la longitud que penetró la aguja en el cemento asfáltico en unidades de 0,1 mm.

A medida que su peso específico del asfalto aumenta la penetración decrece, y se endurece, pero la ley que relaciona ambas características varía para cada tipo de asfalto. El valor más conveniente para el aglomerante bituminoso de un pavimento depende del clima, de la clase de material, del tipo de tráfico y del tipo de rodadura a construirse.

Ductilidad.

La ductilidad puede definirse como la capacidad de un asfalto de sufrir alargamientos sin disgregación de su masa.

Esta es sin duda, una de las más interesantes propiedades del asfalto desde el punto de vista de su aplicación práctica, porque es la que le da, junto con la adhesividad, sus excelentes propiedades

como ligante. En casi todas sus aplicaciones, el asfalto queda sometido a tracciones y compresiones alternativas que resiste deformándose, pero sin romperse, gracias a su ductilidad.

Fragilidad.

Todos los materiales son frágiles en mayor o menor grado ante determinados esfuerzos, estos pueden ser de dos tipos:

- ❖ Rotura sin deformación plástica apreciable, que se produce tan pronto como la tensión que actúa sobre el material, alcanza un valor terminado.
- ❖ Rotura plástica, que se produce cuando se impone a un cuerpo plástico una velocidad de deformación superior a un valor determinado.

Para valores inferiores de la velocidad de deformación, el material se deforma hasta alcanzar su límite de ductilidad.

La fragilidad de un asfalto determinado depende fundamentalmente de la temperatura y la velocidad de deformación, esta última depende de la tensión aplicada y de la viscosidad.

“El estudio de la fragilidad es muy complicado y sólo existen ensayos- empíricos que permiten obtener una idea aproximada del comportamiento de cada tipo de asfalto en este aspecto” (Velasquez, 1970). El ensayo de punto de fragilidad Fraas con frecuencia es el más usado.

Peso específico.

Se define el peso específico de un material - como la relación del peso de determinado volumen de este material al del mismo volumen de agua destilada a temperaturas determinadas.

La determinación del peso específico del asfalto a diversas temperaturas es de gran interés por ser numerosas las aplicaciones en que es preciso emplear un peso determinado del material, y éste se aplica fundido, por lo que resulta mucho más fácil la medición de volúmenes que la de pesos.

El peso específico del asfalto varía según su origen y proceso de destilación, manteniéndose siempre sensiblemente igual a la unidad. En asfaltos del mismo origen, el peso específico aumenta ligeramente cuando la penetración disminuye.

2.2 CLASIFICACIÓN

2.2.1 CLASIFICACIÓN DEL ASFALTO POR SU USO EN PAVIMENTOS

La mayor parte del asfalto producido y empleado en el mundo es extraído del petróleo, estos asfaltos derivados del petróleo son obtenidos mediante refinación o destilación, teniéndose diversos tipos, los cuales se pueden clasificar de acuerdo a su uso en la fabricación de mezclas asfálticas en:

- ❖ Emulsiones asfálticas.
- ❖ Asfaltos diluidos.
- ❖ Asfaltos espumados.
- ❖ Crudos pesados.
- ❖ Asfaltos naturales.
- ❖ Cemento asfáltico.
- ❖ Asfaltos modificados y multigrados.

A continuación se realiza una descripción resumida de los asfaltos más utilizados en el mundo y nuestro medio.

2.2.1.1 EMULSIONES ASFÁLTICAS.

Estas constituyen otro tipo de los procedimientos que se usan para fluidificar el cemento asfáltico y hacer aplicaciones en frío. Obtenidos de los productos bituminosos por la dispersión de pequeñas partículas de un betún asfáltico en agua con un emulsificante, o de una fase acuosa en una fase asfáltica, presentando partículas electrizadas y un tiempo de ruptura variable.

Se produce un desequilibrio eléctrico por el contacto de la emulsión con agregado llevando a las partículas del asfalto a recubrir la superficie de los agregados y unirse a este posteriormente el agua fluye o se evapora, separándose de las partículas pétreas recubiertas por el asfalto.

Las emulsiones asfálticas son preparadas por mezcla de cemento asfáltico, agua, acidulante y tensoactivos en un molino coloidal.

Las emulsiones asfálticas se pueden clasificar por el tipo de carga de partícula en:

- ❖ Emulsiones Asfálticas Aniónicas (EAA)
- ❖ Emulsiones Asfálticas Catiónicas (EAC)
- ❖ Emulsiones Asfálticas No-iónicas (EANI)

Y por el tipo de ruptura o quiebre en:

- ❖ Ruptura o quiebre Rápida, RS
- ❖ Ruptura o quiebre Media, MS
- ❖ Ruptura o quiebre Lenta, SS

Las características de ruptura son controladas principalmente por la naturaleza y cantidad de agente emulsificante.

2.2.1.2 ASFALTOS DILUIDOS.

También denominados asfaltos cut backs, se definen según el Instituto de Asfalto como “material asfáltico cuya consistencia blanda hace que salga del campo en que se aplica el ensayo de penetración, cuyo límite máximo es 300”.

Están compuestos por una base asfáltica (cemento asfáltico) y un fluidificante volátil que puede ser bencina, kerosene o aceite.

La mayor cantidad de asfaltos diluidos o rebajados se fabrica por el método intermitente. Se bombea el solvente adecuado a un recipiente y cuando ya se dispone de una cantidad considerable, se añade asfalto caliente (fluido) y los componentes se mezclan por agitación mecánica.

Los asfaltos diluidos son considerados peligrosos para el medio ambiente debido a que se volatiliza al esparcirlo en el pavimento el solvente.

2.2.1.3 ASFALTOS ESPUMADOS.

También denominados asfaltos celulares, son una tecnología utilizada principalmente para estabilización de granulares no tratados o para la fabricación de mezclas en frío y recicladas. Consiste en adicionar agua fría (1% a 2% del peso del CA) y aire a presión, en una “cámara de expansión”, a un cemento asfáltico que se encuentra a alta temperatura (160-180°C) con el fin de espumarlo, incrementar su volumen rápidamente, reducir viscosidad del ligante incrementar la adherencia entre el asfalto y el agregado pétreo (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

Espumar el asfalto mejora sus propiedades adherentes, haciéndolo apto para mezclar con agregados fríos y húmedos, además reduce considerablemente su viscosidad del cemento asfáltico.

2.2.1.4 CRUDOS PESADOS

Son crudos de petróleo que son usados para la pavimentación. En Colombia existe el crudo de castilla que es el más usado, proviene de la explotación del campo ubicado en el municipio de Castilla de ese país.

2.2.1.5 ASFALTOS NATURALES

Los asfaltos naturales presentan un punto de ablandamiento alto (superior a 90°C) estos materiales están compuestos por hidrocarburos de alto peso molecular, y en el mundo son conocidos como materiales endurecedores de asfaltos por su alta cantidad de asfaltenos.

2.2.1.6 CEMENTO ASFÁLTICO

Conocidos también como cementos asfálticos no modificados.

El cemento asfáltico se designa por las letras CA O AC (Asphalt Cement en un país anglosajón) y se clasifican por lo general de acuerdo con su consistencia evaluada a través de dos ensayos: penetración y viscosidad. Otra forma de clasificación, utilizada principalmente en países desarrollados, se realiza a través del Grado de Funcionamiento (PG por sus siglas en inglés) (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

Según el Instituto de Asfaltos, los cementos asfálticos se clasifican bajo tres sistemas diferentes, ellos son: viscosidad, viscosidad después del envejecimiento y penetración. Cada sistema abarca diferentes grados, cada uno con diferentes grados de consistencia.

Viscosidad:

En la siguiente tabla se muestra el sistema en forma de tablas que es el más usado en estados unidos.

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC- 2.5	AC- 5	AC - 10	AC - 20	AC - 30	AC - 40
Viscosidad, 60° poises	250-50	500±100	1000±200	2000±400	3000±600	4000±800
Viscosidad 135° Cs-mínima	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25° C 100 g.,5 segundos - mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto inflamador, cleveland. °C(°F)-mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, por cierto-mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:						
Perdida por calentamiento, porciento-maximo (opcional) ³		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60° C, poises - máximos	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm mínimo	100 ¹	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) ² con :						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					

**Tabla 5: Requisitos Para Cemento Asfaltico Clasificado Por Viscosidad A 60°c
(Clasificación basada en asfalto original)**

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute

¹ Si la ductilidad es menor que 100, el material será aceptado si la ductilidad a 15.6° C tiene un valor mínimo de 100

² El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá de especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

³ El uso de requisito de perdida por calentamiento es opcional.

Se puede observar en la tabla, que cuanto más alto es el número de poises más viscoso es el asfalto. Además la clasificación va de un asfalto blando a un asfalto duro, donde el AC-2.5 es conocido como un asfalto “blando” y el AC-40 es conocido como un asfalto “duro”.

Viscosidad después del envejecido:

La idea es identificar cuáles son las características de viscosidad después de que se ha colocado el asfalto en el pavimento. Para poder simular el envejecimiento que ocurre en la planta asfáltica durante el mezclado, el asfalto debe ser ensayado en el laboratorio utilizando un ensayo patrón de envejecimiento. El residuo asfáltico que queda después del envejecimiento es clasificado, posteriormente, de acuerdo a su viscosidad. Una vez más la unidad normal de medida es el poise (Asphalt Institute, 1992).

La siguiente tabla identifica los posibles grados bajo este sistema.

PRUEBAS SOBRE EL RESIDUO DE ENSAYO DE LA NORMA AASHTO T 240 ¹	GRADO DE VISCOSIDAD				
	AR - 10	AR - 20	AR - 40	AR - 80	AR - 160
Viscosidad, 60° poises	1000±250	2000±500	4000±1000	8.000±2000	16000±4000
Viscosidad 135° Cs-mínima	140	200	275	400	550
Penetración, 25° C 100 g.,5 segundos - mínimo	65	40	25	20	20
Porcentaje de Pen original, 25° C - mínimo	-	40	45	50	52
Ductilidad 25° C, 5 cm por minuto, cm-mínimo	100 ²	100 ²	75	50	52
PRUEBAS SOBRE EL ASFALTO ORIGINAL					
Punto inflamador, cleveland, °C(°F)- mínimo	205(400)	219(425)	227(440)	232(450)	238(460)
Solubilidad de triclorotileno, por ciento mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0

**Tabla 6: Requisitos Para Cemento Asfáltico Clasificado Por Viscosidad A 60°C
(Clasificación basada en el residuo del ensayo de RTFO)**

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute.

¹ AASHTO 179 (TFO) puede ser usado, pero AASHTO T 240 deberá ser el método de referencia.

² Si la ductilidad es menor que 100 el material será aceptado si la ductilidad a 15.60 C tiene un valor / mínimo de 100.

La abreviación “AR” corresponde a “residuo envejecido”. Obsérvese que el AR-10 (viscosidad de 1000 poises) se conoce como un asfalto “blando”, mientras que el AR-160 (viscosidad de 16000 poises) se conoce como un asfalto “duro”.

Penetración:

Este método se ha vuelto empírico extemporáneo dejando atrás el avance tecnológico, es el tercer método para clasificar asfaltos, la siguiente figura muestra cómo se realiza el ensayo de

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

penetración. Donde bajo una carga dada y con una aguja normal se deja penetrar dentro de la muestra del cemento asfáltico.

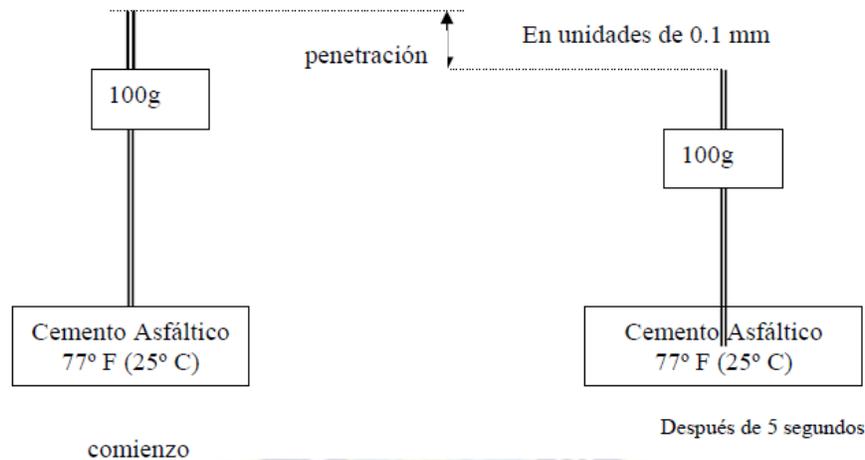


Figura 9: Diagrama de la Prueba de Penetración

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute.

Un grado 200-300 indica que la aguja penetró en la muestra, bajo condiciones específicas, de 200 a 300 décimas milímetro. Esto es indicación de un asfalto “blando”. Un grado 40-50, por otro lado, es indicación de un asfalto “duro” en el cual la aguja fue capaz de penetrar solamente de 40 a 50 décimas de milímetro (Asphalt Institute, 1992).

La siguiente tabla muestra los distintos grados incluidos bajo este sistema.

GRADO DE PENETRACIÓN										
	40 – 50		60 – 70		85 – 100		120 – 150		200 – 300	
	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max
Penetración, 25° C 100 g., 5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto inflamador, cleveland, °C	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad 25° C, 5 cm por minuto	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad de triclorotileno, por ciento	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
TFO 3.2 mm, 63° C, 5 horas										
Perdida por calentamiento, Por ciento	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo, Por ciento del original	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25° C. 5 cm por min., cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Prueba del mancha (cuando y como se especifica) (ver nota) :										
Solvente normal del nafta	Negativo para todos los grados									
Solvente de nafta – xileno. % xileno	Negativo para todos los grados									
Solvente de heptano – xileno. % xileno	Negativo para todos los grados									

Tabla 7: Sistema de Clasificación por Penetración requisitos PARA UNA ESPECIFICACIÓN PARA EL CEMENTO ASFALTICO AASHTO M20

Fuente: Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en caliente del Asphalt Institute.

Nota: El uso de la prueba de mancha es opcional. El ingeniero deberá especificar el tipo de solvente usado cuando se va a usar la prueba. En el caso de los solventes de xileno, deberá de especificar el porcentaje de xileno a ser usado.

2.2.1.7 ASFALTOS MODIFICADOS

Son los cementos asfálticos combinados o modificados con la adición de un modificante para mejorar las propiedades físicas de este.

Es preciso recalcar que debido al enfoque de la investigación solo se centra la atención en los últimos dos, siendo estos, los asfaltos seleccionados para el proyecto.

2.3 ASFALTOS MODIFICADOS

Con el pasar de los años se fue comprobando que los asfaltos convencionales no son capaces de resistir a temperaturas extremas (elevadas y bajas temperaturas) que presentan muchos países, las condiciones climáticas, humedad y el exceso de carga. Esto se ve reflejado en los pavimentos construidos que presentan deterioros prematuros, debido a fallas por ahuellamiento, mala adherencia, etc. sin mencionar la mala ejecución y control de calidad deficiente en el diseño de la misma. Además en la última década el parque automotor incrementó considerablemente provocando altos índices de tráfico vehicular.

Es así que hace más de treinta años se investiga y se busca mejorar la calidad del cemento asfáltico induciendo en incorporar ciertos productos a la mezcla con la finalidad de mejorar alguno de sus propiedades, tal que su aplicación sea más eficaz bajo diferentes condiciones desfavorables de servicio.

Se presentan casos en los que las características de las mezclas asfálticas obtenidas con los cementos asfálticos convencionales no son capaces de resistir la acción conjunta del tránsito y del clima, por lo que resulta necesaria la utilización de ligantes modificados que presenten mejores propiedades reológicas, un mayor grado de adherencia, mayor resistencia al envejecimiento y menor susceptibilidad térmica. (Reyes Lizcano, 2003).

En el mundo, la tecnología de los asfaltos modificados ha sido una técnica ampliamente utilizada para mejorar las características que presentan las mezclas asfálticas convencionales esto ha originado dentro de la clasificación de cementos asfálticos al igual que para las emulsiones asfálticas la posibilidad de modificarlos mediante la disolución o incorporación de polímero, fibras, hidrocarburos o hule molido de neumáticos, etc.

Las propiedades ingenieriles que se buscan mejorar en el cemento asfáltico con la utilización de los modificadores y aditivos son:

- ❖ Resistencia a la ruptura por fatiga
- ❖ Resistencia a la deformación permanente
- ❖ Disminución a la fragilidad con temperaturas muy bajas

- ❖ Aumento en la cohesión con altas temperaturas
- ❖ Mejorar la resistencia al impacto
- ❖ Disminuir el drenado de asfalto en mezclas de graduación abierta
- ❖ Reducir el endurecimiento debido al envejecimiento
- ❖ Disminuir la sensibilidad a la humedad
- ❖ Mejorar la adherencia de los agregados
- ❖ Rejuvenecer el cemento asfáltico
- ❖ Mejorar la abrasión de las mezclas asfálticas

Para ampliar su resistencia, los cementos asfálticos de petróleo pueden ser modificados a través de adiciones de: asfaltos naturales como gilsonitas (EUA), asfaltita (Argentina), el asfalto de Trinidad, por la adición de finos (cal, cemento, sílica, etc.), fibras (fibra de vidrio, asbestos, fibra de celulosa y fibras poliméricas) o por azufre elemental. (López Laberian, 2004).

Los Asfaltos Modificados son obtenidos por la combinación de un modificante y asfaltos compatibles entre sí, favoreciendo la obtención de mezclas con mayor durabilidad y elasticidad principalmente, una primera instancia la modificación se realizó con la adición de polímeros tipo elastómero y plastómero. Entre los agentes modificantes con polímeros que se encuentran son:

Homopolímeros

Copolímeros: (Ejemplos: EVA, SBS)

Plastómeros: Dentro de estos tenemos:

- ❖ EVA: etileno-acetato de vinilo.
- ❖ EMA: Etileno-acrilato de metilo
- ❖ PE: (polietileno)
- ❖ PP: (Polipropileno).
- ❖ Poliestireno: no son casi usados.

Elastómeros: son elásticos. Dentro de estos tenemos:

- ❖ Natural: caucho natural, celulosa, glucosa, sacarosa, ceras y arcillas son ejemplos de polímeros orgánicos e inorgánicos naturales
- ❖ SBS:(estireno-butadieno-estireno) o caucho termoplástico.
- ❖ SBR: Cauchos sintéticos del 25% de Estireno y 75% de butadieno
- ❖ EPDM: (polipropileno atáctico)

Termoendurecibles: estos son las resinas epoxi.

Otros agentes modificantes son: cal hidratada, fibras (como los minerales, orgánicas y sintéticas), cemento portland, silicones, fillers, complejos de metal, etc.

No se da más detalles de los agentes modificantes ya que este tema se encuentra fuera de alcance de este proyecto.

2.3.1 ASFALTOS MODIFICADOS CON MATERIALES DE DESECHO

Como ya se mencionó la modificación del asfalto ya no es una técnica nueva, cada vez es más común y necesario realizar la modificación del asfalto para mejorar sus propiedades reológicas.

Uno de los problemas a nivel mundial radica en las grandes dificultades en la gestión de los residuos no biodegradables que provienen de la Industria. Un método factible de tratar los materiales de desecho es el uso de los mismos en mezcla asfáltica. Incorporando como agente modificante en cementos asfálticos el cual se fue realizando e investigando a lo largo de los últimos años.

Tales modificaciones, con materiales de desecho se realizaron con los siguientes fines; obtener productos asfálticos con mejores propiedades reológicas, mitigar el impacto ambiental y convertirlos a estos en aliados en las investigaciones y así reciclarlos y/o reutilizarlos de la mejor manera, que en muchos casos estos son descartados de formas no adecuadas.

Los países que más investigan las modificaciones con materiales de desecho son: Costa Rica, Colombia y desde luego nuestro país Bolivia.

Considerando que la práctica de la modificación del asfalto cada vez es más común. Pero la experiencia de la modificación del asfalto con materiales de desecho es poco, con excepción de ciertos polímeros reciclados y comerciales.

Los materiales de desechos utilizados como agente modificante a nivel mundial con los que se realizaron investigaciones se encuentran las siguientes:

- Bolsas de polietileno
- Polipropileno
- Bumper de coches
- Cauchos de llantas recicladas
- Cascara de arroz (ceniza)
- Aceites en desuso
- Botellas pet.

2.4 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Las mezclas asfálticas también conocidas como mezclas bituminosas o aglomerados bituminosos están formadas por una combinación de agregados minerales y un ligante hidrocarbonado, de manera que las partículas queden cubiertas por una película continua de éste. (Kramer, 1999). Estas se fabrican en unas centrales fijas o móviles, que posterior a ello son transportados a la obra y allí se extienden y se compactan.

El concreto asfáltico está constituido 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.

Es de vital importancia analizar y visualizar el comportamiento de la mezcla asfáltica como un sistema, al cemento asfáltico actuando junto con el agregado mineral, en lugar de analizar por separado sus propiedades.

Las mezclas asfálticas reciben directamente las acciones de los vehículos, y deben soportar estas cargas y transmitir las a las capas inferiores, proporcionando condiciones adecuadas de rodadura, es decir deben proporcionar superficies de rodamiento cómodas, seguras y económicas a los usuarios de las vías de comunicación, porque las cualidades residen fundamentalmente en su superficie, facilitando la circulación de los vehículos.

Son utilizadas ampliamente las mezclas asfálticas en la construcción de carreteras, pavimentos industriales, aeropuertos, entre otros. Sin olvidar que se utilizan en las capas inferiores de los firmes para tráfico pesado intenso.

De su acabado y de los materiales que se hayan empleado en su construcción dependen aspectos tan interesantes y preocupantes para los usuarios como:

- ❖ La adherencia del neumático al firme o pavimento.
- ❖ Las proyecciones de agua en tiempo de lluvia.
- ❖ El desgaste de los neumáticos.
- ❖ El ruido en el exterior y en el interior del vehículo.
- ❖ La comodidad y estabilidad en marcha.
- ❖ Las cargas dinámicas del tráfico.
- ❖ La resistencia a la rodadura (consumo de carburante).
- ❖ El envejecimiento de los vehículos.
- ❖ Las propiedades ópticas.

Los aspectos citados son asociados principalmente a la textura y la regularidad superficial del pavimento.

Según las condiciones de velocidad y la región o condiciones climáticas, etc., en una mezcla asfáltica en los métodos de diseño se debe optimizar en general, las siguientes propiedades:

- ❖ Estabilidad.
- ❖ Durabilidad.
- ❖ Resistencia a la fatiga.

Si la mezcla se usa como capa de rodadura hay que añadir las propiedades siguientes:

- ❖ Resistencia al deslizamiento.
- ❖ Regularidad.
- ❖ Permeabilidad adecuada.
- ❖ Sonoridad.
- ❖ Color, entre otras.

2.4.1 CLASIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

Existen varios parámetros de clasificación de las mezclas asfálticas, para establecer las diferencias entre las distintas mezclas y las clasificaciones pueden ser diversas:

2.4.1.1 POR EL PROCEDIMIENTO DE MEZCLADO

- ❖ **Mezclas asfálticas en caliente:** estas mezclas son utilizadas en carpetas asfálticas de alta resistencia estructural elaboradas en una planta mezcladora estacionaria o móvil, provista del equipo necesario para calentar los componentes de la mezcla a temperaturas mayores de 110°C.
- ❖ **Mezclas asfálticas en frío:** son aquellas que emplean emulsiones asfálticas o asfaltos diluidos como aglutinante del material pétreo, elaboradas en una planta mezcladora móvil.
- ❖ **Mezclas asfálticas por el sistema de riegos:** se colocan sobre una carpeta asfáltica nueva o existente con el objeto de proporcionar resistencia al deslizamiento y al pulimiento. Estas requieren para su construcción uno, dos o hasta tres riegos de un material asfáltico, intercalados con una, dos o tres capas sucesivas de material pétreo triturado de tamaños decrecientes.

2.4.1.2 POR EL CONTENIDO DE VACÍOS EN LA MEZCLA

De acuerdo al contenido de vacíos se clasifica en mezclas densas, semidensas, abiertas y porosas.

- ❖ **Mezclas densas:** o también conocidas como cerradas son aquellas que poseen menos del 6% de vacíos, garantizando la protección de las capas inferiores del pavimento debido a su impermeabilidad.
- ❖ **Mezclas semidensas o semicerradas:** contienen de un 6% a un 12% de vacíos y la estructura de su agregado pétreo puede contener como máximo partículas con tamaño nominal de hasta 12.5 mm (1/2").
- ❖ **Mezclas abiertas:** contienen de un 12% a un 20% de vacíos por lo que es muy escaso el contenido de finos en su granulometría.
- ❖ **Mezclas drenantes:** contienen más del 20% de vacíos son bastante permeables y muy flexibles logrando desalojar el agua rápidamente hacia las cunetas y adaptarse a los asentamientos del cuerpo del pavimento sin que se presenten fisuras o agrietamientos.

2.4.1.3 *POR EL TAMAÑO DEL AGREGADO*

Aquellas mezclas que poseen como tamaño máximo de partículas, mayores de 5 [mm] son consideradas como de textura gruesa.

- ❖ **Mezclas con textura gruesa:** son regularmente empleadas como carpetas asfálticas y aportan al pavimento la rugosidad y aspereza debido al tamaño y origen del agregado.
- ❖ **Mezclas con textura fina:** contienen partículas menores de 5 [mm] y no poseen capacidad estructural por lo que son empleadas únicamente como tratamientos superficiales.

2.4.1.4 *POR LA ESTRUCTURA DEL AGREGADO*

- ❖ **Mezclas que tienen un esqueleto mineral resistente:** estas contribuyen a la cohesión de la estructura mediante el rozamiento interno de sus agregados. Las mezclas con esqueleto mineral son económicas por el contenido reducido del ligante.
- ❖ **Mezclas que tienen un esqueleto mineral débil:** estos ocasionan que la mezcla dependa en demasía de la rigidez del cemento asfáltico para lograr una adecuada resistencia al corte.

2.4.1.5 *POR SU GRANULOMETRÍA*

- ❖ **Mezclas con granulometría continua:** poseen una distribución uniforme logrando que los vacíos originados por las piedras más grandes sean ocupados por material más fino.
- ❖ **Mezclas con granulometría discontinua:** solo contienen materiales de tamaños específicos originando mezclas bastante impermeables.

2.4.1.6 *POR LAS FRACCIONES DE AGREGADO EN LA MEZCLA*

- ❖ **El mástico bituminoso:** es una combinación de cemento asfáltico con relleno mineral (filler), lo que resulta en una mezcla con alta impermeabilidad pero con una baja resistencia.
- ❖ **El mortero bituminoso:** es la combinación de agregado fino con cemento asfáltico.
- ❖ **Macadam bituminoso:** se conoce así a la combinación de agregado grueso con cemento asfáltico.
- ❖ **El concreto asfáltico:** es una mezcla bituminosa que esta está compuesto por agregado grueso más mortero asfáltico, en donde las partículas de agregados están esencialmente graduadas de manera continua para formar una estructura entrelazada.

2.5 **RECICLADO EN BOLIVIA**

En un artículo escrito en el periódico página siete muestran que Bolivia genera 7 mil toneladas de basura al día y de esto sólo se reciclaba el 4%.

Según la Dirección de Residuos Sólidos y gestión Integral del Ministerio de Medio Ambiente y Agua el país producía diariamente al menos 5.400 toneladas de basura y de esto procesaba el 4%.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Tres años después, la producción de desechos había incremento en un 30%; y el porcentaje del reciclaje se mantenía hasta el año pasado.

Un reciente artículo elaborado por el periódico La Razón Bolivia (Vásquez, 2019) dice que Bolivia recicla el 18,2% de los residuos que recoge al año.

De acuerdo con cifras del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), de los 1,61 millones de toneladas de residuos sólidos que se recolectaron el año pasado en Bolivia el 84,3% provino de los hogares, el 9,8% de los mercados, el 3,52% de industrias y mataderos, el 1,69% de las áreas públicas y el 0,6% de los establecimientos de salud.

El 55,2% de toda esa basura es orgánica, 10,2% plástico, 6,5% papel y cartón, 2,9% vidrio, 2,5% metales y 22,7% de otra índole, según datos de la Cámara Nacional de Industrias (CNI), que advierte que el reciclaje es de apenas el 1,5% en el caso de los residuos biológicos y del 16,6% en el resto de los materiales.

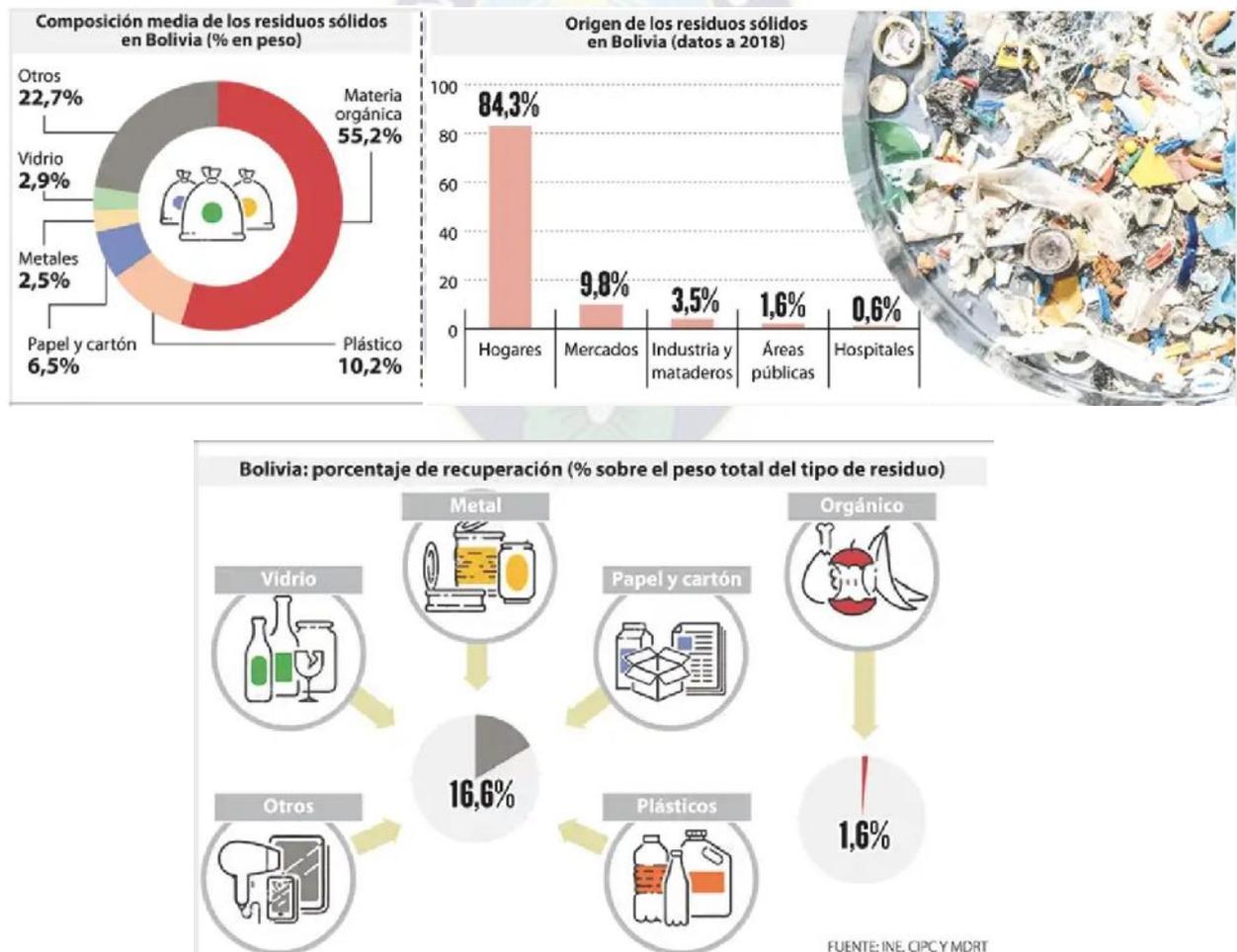


Figura 10: Composición Media, Origen y Porcentaje de Recuperación de Residuos Sólidos

Fuente: INE, CIPC Y MDRT

Según este dato, Bolivia no recicla ni una quinta parte de la basura que se recolecta por lo que son necesarias políticas que promuevan la reducción, reuso y reciclaje. Porque el problema con la basura es un problema creciente en Bolivia.

El problema de la basura en Bolivia se encuentra lejos de una solución. Por el reciente suceso ocurrido en la ciudad de La Paz, el deslizamiento en el relleno sanitario de Alpacoma, que sacó a luz un problema que se va acarreado desde hace años, en Bolivia y el mundo.

Según el artículo publicado por el periódico Pagina Siete, elaborado por Alejandra Gonzales Rocabado que se basa en el reporte del Banco Mundial, titulado “What a Waste 2.0” (2018), el mundo genera 2010 millones de toneladas de residuos sólidos municipales anualmente. Para tener una idea de lo que ésta cifra representa, la misma equivaldría en peso, a más de 14 millones de ballenas azules (La ballena azul es el animal más grande del mundo, llegando a pesar hasta 140 toneladas). Toda ésta basura generada está “ahogando” los océanos, lagos, ríos, está obstruyendo los drenajes y causando inundaciones, transmitiendo enfermedades, aumentando las afecciones respiratorias por causa de la quema, está convirtiendo nuestro planeta en un basural. Y el panorama no es alentador, las estimaciones del reporte sugieren que esa cifra incrementaría a 3400 millones de toneladas de residuos sólidos para el año 2050.



Figura 11: Reciclado de Materiales de Desecho

Fuente: La Razón Bolivia

Dado el panorama presentado en Bolivia, la problemática de la basura es bastante crítica. Por razones como esta es que el reciclaje se ha vuelto en las últimas décadas en un elemento fundamental de la economía circular, un modelo que evita el despilfarro de recursos naturales y potencia el desarrollo sostenible de países como Suiza, que le da un nuevo uso al 99% de su basura.

2.6 PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Los parachoques del coche son accesorios o piezas (partes de desgaste) de la carrocería, situado en la parte delantera del coche (llamado parachoques delantero) y la parte trasera (llamado parachoques trasero), el cual está diseñada para amortiguar y proteger al vehículo en caso de colisión. Frederick Simms inventó el parachoques para carro en 1901.

Durante los últimos tiempos la fabricación de los parachoques o bumpers sufre cambios con el objeto de mejorar sus propiedades y que sean más resistentes estas, los parachoques existentes son los siguientes:

- ❖ Parachoques con fibras de vidrio
- ❖ Parachoques de aluminio
- ❖ Parachoques de acero
- ❖ Parachoques de plástico

Este último utilizado para el presente proyecto (desecho de parachoques), los parachoques actualmente están fabricados con olefinas termoplásticas o TPOs, policarbonatos, poliésteres, polipropileno, poliuretanos, poliamidas que son las principales resinas utilizadas, y muchos parachoques contienen una combinación de estos diferentes materiales.

Las olefinas termoplásticas son un tipo utilizado en la industria automotriz por sus cualidades de absorción de energía, facilidad de fabricación y bajo costo. Un termoplástico es un plástico que puede ser calentado varias veces y conserva su plasticidad, o la capacidad de ser moldeado en caliente.

En los materiales termoplásticos sus macromoléculas están dispuestas libremente sin entrelazarse. Tiene la propiedad de reblandecerse con el calor, adquiriendo una forma que conserva al enfriarse.

En la actualidad, más de 90 % de los sistemas de parachoques en América del Norte están hechos de materiales a base de poliolefina. En 2005, TPO representó el 75% del mercado de parachoques de plástico de América del Norte, mientras que el uso de contenido de parachoques RIM y PC / PBT disminuyó a 20% y 1%.



Figura 12: Parachoques de Vehículos

Fuente: elaboración propia



CAPÍTULO III
DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

3 CAPÍTULO III: DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

En el capítulo anterior se hizo la definición de mezclas asfálticas y de los distintos tipos, entonces de manera general una mezcla es el conjunto de áridos bien graduados, cementados que estas forman una masa sólida, y se identifica un hormigón por el tipo de aglomerante empleado en la fabricación del mismo es por eso que en este capítulo nos enfocamos en los fabricados con asfalto.

“El hormigón asfáltico en caliente es una mezcla de áridos bien graduados secados por calentamiento a temperatura relativamente elevada y mezclados en caliente con betún asfáltico” (J. Rogers Martin, 1963), es por eso que no sólo es importante ensayar el asfalto y los áridos separadamente, también deben realizarse ensayos sobre combinaciones de estos materiales hasta establecer las proporciones y características adecuadas para estas mezclas.

El objetivo principal en el diseño de mezclas asfálticas es encontrar la combinación más económica de agregado pétreo – asfalto, y su análisis está enfocado en los siguientes aspectos:

Propiedades consideradas en el diseño de mezclas. Estos son:

- ❖ **Durabilidad.** Es la resistencia que se opone a factores tales como la desintegración del agregado debido a la acción del tráfico y de los agentes atmosféricos, cambios en las propiedades del asfalto y separación de las películas de asfalto.
- ❖ **Estabilidad.** Es la capacidad para resistir desplazamiento y deformación bajo las cargas del tránsito. Depende de la fricción y de la cohesión interna.
- ❖ **Impermeabilidad.** Es la resistencia al paso de aire y agua hacia su interior o a través de él.
- ❖ **Trabajabilidad.** Es la facilidad con que una mezcla puede ser colocada y compactada. Es afectado por la granulometría, forma de las partículas, temperatura de la mezcla durante la colocación y compactación, porcentaje de asfalto, etc.
- ❖ **Flexibilidad.** Capacidad de un pavimento asfáltico para acomodarse, sin que se agriete, a movimientos y asentamientos graduales de las capas inferiores.
- ❖ **Fluencia.** Deformación bajo la acción repetida de cargas de tránsito. Los vacíos relacionados con el contenido de asfalto y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga.
- ❖ **Resistencia al Deslizamiento.** Habilidad de una superficie de pavimento de minimizar el deslizamiento o resbalamiento de las ruedas de los vehículos, particularmente cuando la superficie está mojada.

Las características que debemos obtener en la mezcla. Entre las más importantes se tiene:

- ❖ Dosificación óptima de la mezcla asfáltica para garantizar un pavimento durable.
- ❖ Adecuada estabilidad para que satisfaga las demandas de tránsito sin producir deformación o desplazamiento.

- ❖ Un contenido de vacíos lo suficientemente alto para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo las cargas del tránsito sin que se produzca exudación o pérdida de estabilidad.
- ❖ Trabajabilidad para permitir una colocación eficiente sin segregación.

Características y Comportamiento de la Mezcla. El factor que debe ser considerado en el comportamiento de la mezcla asfáltica, es el de los parámetros volumétricos que proporcionan una idea del probable funcionamiento de la misma. Las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica compactada son:

- ❖ Densidad de la mezcla.
- ❖ Vacíos de aire, o simplemente Vacíos.
- ❖ Vacíos en el agregado mineral – VMA.
- ❖ Estabilidad.
- ❖ Fluencia.
- ❖ Contenido de asfalto.

3.1 EVOLUCIÓN DE LOS DISEÑOS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE.

A continuación se presenta la evolución de los métodos de diseños de mezclas asfálticas en caliente, según (Padilla Rodriguez).

- ❖ **The Hubbard-Field (1920's).** Método de diseño de mezclas asfálticas, fue uno de los primeros métodos en evaluar contenidos de vacíos en la mezcla y en el agregado mineral. Usaba una estabilidad como prueba para medir la deformación. Funcionó adecuadamente para evaluar mezclas con agregado pequeño o granulometrías finas, pero no también para mezclas con granulometrías que contenían agregados grandes.
- ❖ **Método Marshall (1930's).** Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado durante la segunda Guerra Mundial y después fue adaptado para su uso en carreteras. Utiliza una estabilidad y porcentaje de vacíos como pruebas fundamentalmente. Excepto cambios en las especificaciones, el método no ha sufrido modificación desde los años 40's.
- ❖ **Método Hveem (1930's).** Método de diseño de mezclas asfálticas, desarrollado casi en el mismo tiempo que el método Marshall. Evalúa una estabilidad pseudotriaxial.
- ❖ **Método de la Western Association of State Highway on Transportation Officials, WASHTO (1984).** Este método de diseño de mezclas recomendó cambios en los requerimientos del material y especificaciones de diseño de mezclas para mejorar la resistencia del carril.
- ❖ **Método de Asphalt Aggregate Mixture Analysis System. AAMAS (1987).** La necesidad de cambios en el diseño de mezclas fue reconocida, tardaron 2 años para desarrollar un nuevo proyecto para el diseño de mezclas, que incluía un nuevo método de

compactación en laboratorio y la evaluación de las propiedades volumétricas, desarrollo de pruebas para identificar las deformaciones permanentes, grietas de fatiga y resistencia a las grietas a baja temperatura.

- ❖ **Método SUPERPAVE (1993).** El método AAMAS, sirvió como punto de inicio del método SUPERPAVE, que contiene un nuevo diseño volumétrico completo de mezcla, con funcionamiento basado en predicción a través de modelos y métodos de ensayo en laboratorio, grietas por fatiga y grietas por baja temperatura. Los modelos de predicción de funcionamiento fueron completados satisfactoriamente hasta el año 2000. El diseño volumétrico de mezclas en el SUPERPAVE es actualmente implementado en varios estados de los EUA, debido a que ha sido reconocida una conexión entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica caliente y su correcto funcionamiento. Tiene su resultado, ahora la aceptación en el control de calidad ha sido cambiada a propiedades volumétricas. SUPERPAVE promete un funcionamiento basado en métodos o ensayos de laboratorio que pueden ser usados para identificar la resistencia a las deformaciones plásticas de los pavimentos.

En la práctica de diseño de mezclas asfálticas se ha recurrido a diferentes métodos para establecer un diseño óptimo en el laboratorio correlacionando con el comportamiento de las mezclas en campo. Comúnmente los más utilizados son el método Marshall y Superpave siendo el primero el más común en la práctica.

3.2 MÉTODO MARSHALL

El concepto de esta técnica de diseño fue desarrollado por Bruce Marshall con el departamento de Carreteras del estado de Misisipi siendo US Army Corps of Engineers quien depuró y adicioo ciertos aspectos a las propuestas de Marshall y finalmente desarrollaron criterios de diseño de mezclas al punto de que el ensayo fue normalizado por ASTM y AASHTO. El método Marshall es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad, fluencia, densidad y vacíos.

Una de las virtudes del método Marshall es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacíos del material asfáltico. Este análisis garantiza que las importantes proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla durable.

Es aplicable el método Marshall únicamente a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. Este método utiliza probetas normalizadas de 6.35 mm (2 ½") de alto y 10.16 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto - agregado (ASTM D1559).

El método puede emplearse tanto para proyecto en laboratorio como para control en obra de las mezclas asfálticas en caliente para pavimentación.

3.2.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

En la literatura técnica disponible en español se puede encontrar de forma detallada el método Marshall. A continuación se presenta, en forma resumida el procedimiento del método.

El procedimiento de Marshall comienza con la preparación de probetas de ensayo. Previo a esta operación es necesario que:

- ❖ Los materiales a usar cumplan con las especificaciones del proyecto.
- ❖ Que las mezclas de áridos cumplan las normas fijadas por las especificaciones del proyecto en cuanto a granulometría.
- ❖ Que se disponga de suficiente volumen de áridos secos y divididos por grupos, según su tamaño.
- ❖ Que se determine el peso específico aparente de todos los áridos empleados en la mezcla y el peso del betún asfáltico, con objeto a utilizarlos en los análisis densidad – huecos.

Preparación de las muestras de ensayo

Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimentación son preparadas haciendo que cada una contenga una ligera cantidad diferente de asfalto. La proporción de agregado en las mezclas está formulada por los resultados del análisis granulométrico.

Es necesario preparar una serie de probetas, estas con distintos contenidos de asfalto para determinar el contenido óptimo del cemento asfáltico para una mezcla particular, de modo que en la gráfica de datos se muestre bien definido el valor óptimo, por lo cual el contenido de asfalto se incrementará en 0.5% con al menos dos contenidos de asfalto bajo y sobre el óptimo.

Para obtener datos adecuados, se debe preparar mínimo 3 probetas para cada contenido de asfalto usado.

Las mezclas se preparan de la siguiente manera:

- ❖ El asfalto y el agregado pétreo se calientan y se mezclan completamente hasta que todas las partículas de agregado estén revestidas, previa preparación y peso correspondiente de los mismos. Esto simula los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en la planta.
- ❖ Las mezclas asfálticas calientes se colocan en moldes pre-calentados Marshall de compactación, previa colocación de papel filtro para que no se adhiera la mezcla al compactar, donde se usa el martillo Marshall de compactación.
- ❖ Las mezclas son compactadas mediante golpes del martillo Marshall de compactación. El número de golpes (35, 50 ó 75) depende de la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada briqueta reciben el mismo número de golpes. Así una probeta, Marshall de 35 golpes recibe, realmente, un total de 70 golpes. una

probeta de 50 golpes recibe 100 impactos. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes e identificadas.

3.2.2 PRUEBAS A LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS

En el método Marshall se elaboran tres tipos de pruebas para conocer tanto sus características volumétricas como mecánicas.

Determinación de la gravedad específica o densidad

La prueba de peso específico o bulk puede desarrollarse tan pronto como el espécimen se haya enfriado en un cuarto de temperatura. Esta prueba se hace de acuerdo con la Norma ASTM D1188, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas utilizando parafina; o la ASTM D2726, gravedad específica de mezclas asfálticas compactadas mediante superficies saturadas de especímenes secos.

Para determinar cuál norma se debe utilizar, se realizan pruebas de absorción a la mezcla asfáltica compactada; si la absorción es mayor al 2%, se recurre a la norma ASTM D1188; en caso contrario, se emplea la norma ASTM D2726.

Ensayo de estabilidad y flujo

Después de que el peso específico se ha determinado, se procede a la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen o briqueta 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.

Con el equipo de prueba listo se remueve el espécimen colocado en baño María y cuidadosamente se seca la superficie. Ubicando y centrando el espécimen en la mordaza inferior, se coloca la mordaza superior y se centra completamente en el aparato de carga.

Posteriormente, se aplica la carga de prueba al espécimen a una deformación constante de 51 mm (5") por minuto, hasta la falla. El punto de falla se define 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 la prueba 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 se deberá 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.

Análisis de densidad y vacíos

Después de completar las pruebas de estabilidad y flujo, se lleva a cabo el análisis de densidad y vacíos para cada serie de especímenes de prueba.

Se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, preferentemente los que estén cerca del contenido óptimo de asfalto. Un valor promedio de la gravedad específica efectiva del total del agregado, se calcula de estos valores.

Utilizando la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como 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).

3.3 DEFORMACIONES PLÁSTICAS

Las deformaciones plásticas permanentes en el pavimento resultan ser el mecanismo de deterioro más relevante de las carreteras que están en servicio. Son canales longitudinales que se forman por el paso de ruedas o neumáticos del tráfico vehicular a lo largo de la capa asfáltica, esta deformación es considerada como ahuellamiento o rodera.

Entonces el fenómeno de ahuellamiento es la acumulación de deformaciones plásticas irreversibles en una capa de concreto asfáltico debido al paso repetitivo de los vehículos, que genera la deformación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas, producto de la densificación del material principalmente durante la construcción y flujo plástico, además de la aparición de deformaciones de corte durante la vida útil del pavimento.

El ahuellamiento genera fallas estructurales o funcionales en el pavimento y ocurre en cualquier capa de la estructura, investigadores demostraron que la mayor parte de este se genera en la capa asfáltica.

Según Tarefder (2003) el fenómeno de ahuellamiento es afectado principalmente por tres factores:

- ❖ Mezcla (gradación del agregado, grado de funcionamiento PG del ligante, contenido del asfalto).
- ❖ Carga (presión de la llanta, tipo de eje).
- ❖ Ambiente (temperatura, humedad, precipitación).

En este tipo de fallas, es central que el diseño de la mezcla asfáltica resista las acciones dinámicas del tránsito. Son relevantes las condiciones ambientales, tales como humedad y temperatura, y cobra especial importancia la intensidad del tránsito y la frecuencia del mismo. Las cargas pesadas y lentas serán en general, las que mayor incidencia posean al elevarse el tiempo de permanencia de la carga.

Severidades:

- ❖ Baja: profundidad menor que 10 mm.
- ❖ Media: profundidad entre 10 mm y 25 mm.
- ❖ Alta: profundidad mayor que 25 mm.

Evolución probable: piel de cocodrilo, desprendimientos.

A continuación se muestra las distintas causas por las que se producen las deformaciones plásticas, que son las siguientes:

- ❖ Contenido inadecuado de vacíos en las mezclas convencionales (menos del 3%).
- ❖ Excesivo contenido de vacíos (mayor del 8%) en estas mismas mezclas.
- ❖ Baja viscosidad de los ligantes asfálticos.
- ❖ Errores en el proyecto de la mezcla, ya que las propiedades del ligantes no son las mismas a la temperatura de los ensayos que a la temperatura del servicio en obra. En definitiva se dispone de un ligante más blando que el que estaba previsto.
- ❖ Contaminación del ligante asfáltico con partículas de fuel no quemado.
- ❖ Insuficiente estabilidad del material todavía caliente cuando se ha permitido el paso anticipado del tráfico.
- ❖ Excesiva consolidación bajo tráfico de las capas del pavimento.
- ❖ Tiempo de aplicación de la carga más prologado que el previsto. Las mezclas bituminosas tienen respuestas más elásticas a las cargas de corta duración y menos elásticas a las cargas lentas. Por ésta razón, las deformaciones plásticas se presentan sobre todo en las rampas y en otras zonas de tráfico lento.
- ❖ Factores del proyecto de la mezcla tales como un contenido de arena natural, un bajo contenido de filler, y la existencia de partículas minerales redondeadas.
- ❖ Insuficiente dureza del árido que determina fenómenos atrición y formación de finos con disminución simultánea de huecos.
- ❖ Degradaciones variadas del agregado pétreo.

3.4 ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA EVALUACIÓN DE DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN EL CONCRETO ASFÁLTICO.

Existen varios ensayos de laboratorio para analizar las deformaciones plásticas en pavimento, haremos énfasis en el de tipo Wheel-Track o deformación a pequeña escala, que son esencialmente del tipo simuladores. Los equipos de este ensayo básicamente simulan la carga producida por el tránsito vehicular, mediante una rueda que pasa repetidas veces sobre una muestra de pavimento, sea esta realizada en laboratorio o extraída como testigo de un concreto asfáltico, con una determinada velocidad y carga. Variando entre uno y otro, el equipo también simula condiciones atmosféricas adversas a las cuales se encuentra el pavimento.

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

Conceptualmente, todos los equipos para este ensayo son lo mismo (una rueda cargada es aplicada en una escala de laboratorio), pero estos difieren significativamente en el diseño, la sobrecarga y las condiciones de ensayo. Cada equipo tiene una diferente recomendación y criterio de aceptar o rechazar la mezcla.

En la tabla siguiente se muestra el equipo utilizado de los diferentes países adecuados a sus respectivas condiciones.

	LCPC	Hamburgo	APA	BS	NLT
Carga de la rueda	5000	705	700	520	-
Presión sobre la probeta (kPa)	600	1500	700	-	900
Frecuencia de carga	60	60	45	42	42
Mecanismo de carga	neumático	rueda de acero	rueda de caucho	rueda de caucho	rueda de caucho
Medio del ensayo	Aire	Agua	Aire	Aire	Aire
Masa de probeta (Kg)	20	10	5	variable	variable
Espesor de la probeta (mm)	100	80	75	35 - 55	51
Temperatura del ensayo (°C)	60	50	40	45, 60	60
Ciclos especificados	30000	10000	8000	1890	5040
Máxima deformación permitida	10 mm	4 mm	7 mm	-	15 μ /min

Tabla 8: Propiedades de los Diferentes Ensayos Para la Evaluación de Ahuellamiento

Fuente: Adaptación propia para el proyecto

Algunos de los equipos más utilizados en mundo para realizar ensayos de este tipo son el APA (Asfalt Paviment Analyzer, AASHTO TP 63), el equipo francés LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) y el Wheel – Track de Hamburgo.

El equipo francés LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) utiliza una rueda neumática de 90 mm de ancho y muestras de 180 mm de ancho para el ensayo. Por ser angosta la muestra y por su confinamiento distorsiona el desarrollo del plano de corte del concreto asfáltico, especialmente para mezclas que contienen agregados de mayor tamaño. Como resultado, mezclas pobres tienden a desenvolverse mejor de lo esperado, y es difícil realizar un análisis entre un buen y mal comportamiento de las mezclas.

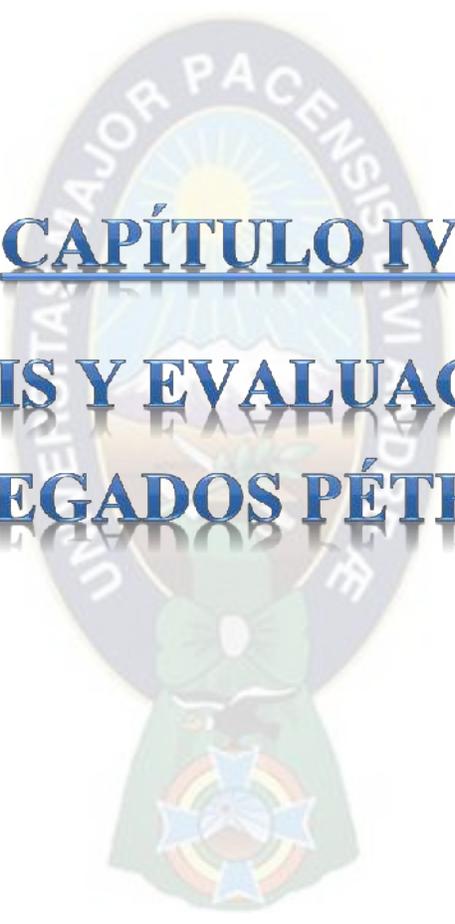
En el ensayo de Wheel – Track De Hamburgo, una losa de mezcla asfáltica rectangular es sumergida en agua a 50 °C y es deformada debido al paso repetido de una carga rodante de acero de 703 N que simula la forma de una llanta vehicular. La severidad del ensayo incrementa por el uso de una rueda de acero el cual no se deforma bajo las condiciones de prueba como una llanta de neumático. Este equipo ha sido utilizado en Alemania para evaluar la susceptibilidad de mezclas asfálticas a la humedad.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

El APA fue originalmente desarrollado en 1985 y bautizado como el Georgia Loaded Ehell Tester. En este equipo se utiliza generalmente la profundidad de desplazamiento medida a 8000 ciclos de carga para evaluar la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas (12.7 cm de ancho, 30.5 cm de largo y 7.6 cm de alto). La huella aplicada es mucho más angosta que de la llanta de un vehículo que pasa sobre un pavimento en servicio.

Por lo tanto la Administración Federal de Carreteras, FHWA (Federal Highway Administration) recomienda lo siguiente; equipos de laboratorio para ahuellamiento no deben ser usados para predecir el actual funcionamiento del pavimento por las diferencias en temperaturas de servicio y condiciones de carga. Así como los criterios locales de una región no son aplicables a otra, por lo tanto cada usuario necesita desarrollar su propia evaluación de resultados usando las condiciones locales.





CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

4 CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

4.1 INTRODUCCIÓN

La denominación de técnica de agregados pétreos en pavimentos se refiere a un conglomerado de partículas inertes de gravas arenas, finos y/o fillers (naturales o triturados), utilizados ya sea para la fabricación de mezclas asfálticas, concretos hidráulicos y materiales estabilizados o para la construcción de capas de terraplén, afirmado, subbase y/o base granular (Rondón Quintana & Reyes Lizcano, 2015).

La evaluación de los agregados pétreos para el uso en la pavimentación depende de la disponibilidad, costo y calidad del material, así como del tipo de construcción proyectada. La conveniencia de un agregado se determina por medio de su evaluación en términos de:

- ❖ Tamaño y granulometría.
- ❖ Limpieza.
- ❖ Resistencia al desgaste.
- ❖ Textura superficial.
- ❖ Forma de partículas.
- ❖ Absorción.
- ❖ Afinidad con el asfalto.
- ❖ Procedencia mineralógica.
- ❖ Análisis químico de los agregados.

Los agregados pétreos deben tener una granulometría adecuada y poseer requisitos mínimos de calidad para conformar mezclas asfálticas.

El análisis y caracterización de agregados pétreos se efectuó realizando los diferentes ensayos correspondientes, encontrando finalmente una combinación de estos que cumplen las siguientes normas: ASTM, Administradora Boliviana de Carreteras ABC, Instituto de Asfaltos y el de Superpave. Para la dosificación del concreto asfáltico.

Las planillas de cálculo para los agregados pétreos del proyecto se encuentran en los anexos.

4.2 FUENTE DE PROVISIÓN DE AGREGADOS

Su procedencia de los agregados pétreos utilizados para el proyecto de grado se detalla a continuación:

Grava de ¾". Estos materiales son de origen natural (rodados) en su gran mayoría, provenientes de la localidad de peñas, del altiplano boliviano del departamento de La Paz.

Gravilla 3/8”. Su procedencia de la gravilla es de la localidad de Palcoco del departamento de La Paz, este agregado es de origen natural y chancado.

Arena Natural. Este material se obtuvo de la localidad de Vilaque en la carretera hacia Copacabana del departamento de La Paz.

Más adelante se muestran los valores obtenidos y las normas de los ensayos de los agregados pétreos, los cuales cumplen con los valores de exigencia especificados en la norma.

4.3 TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

El tamaño de las partículas más grandes en la muestra debe ser determinado, debido a que las especificaciones hablan de un tamaño máximo de partículas para cada agregado usado.

El tamaño máximo del agregado debe estar comprendido entre 1/5 y 2/3 del espesor del concreto asfáltico terminado. Se puede fijar el promedio de estos límites para evitar el riesgo de que en algún punto de la capa de rodadura exista una piedra ocupando todo el espesor en perjuicio de la impermeabilidad y la resistencia. El límite se fija en beneficio de la estabilidad.

Tomando como especificación la norma ASTM D1663 de los espesores utilizados en pavimentos, se tomará el valor de 2 plg. (5.1 cm).

$$\frac{1}{5} * e < T_{\max} < \frac{2}{3} * e$$

$$1.02 \text{ cm} < 1.90 \text{ cm (3/4")} < 3.40 \text{ cm}$$

Para el proyecto se tiene:

AGREGADO	TAMAÑO MÁXIMO (TM)
Grava 3/4”	3/4”
Gravilla 3/8”	1/2”
Arena Natural	3/8”

Tabla 9: Tamaños Máximos de Partículas Utilizados

Fuente: Elaboración propia

4.4 EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Para obtener valores realmente representativos es necesario, la correcta obtención de las muestras de acuerdo a los métodos existentes.

El método para la extracción y preparación de muestras esta descrito por las normas ASTM C75 y AASHTO T2 el cual establece los procedimientos para extraer y preparar las muestras representativas de áridos finos, grueso e integrales para fines de ensayo.

Se realizó la extracción de las muestras para el proyecto de los agregados pétreos de acuerdo a la norma mencionada anteriormente, teniendo el debido cuidado en la obtención de la misma para que sea representativa tal como indica el método e identificados adecuadamente.



Figura 13: Extracción de Muestras de Agregados Pétreos

Fuente: Elaboración propia

4.5 CUARTEO DE MUESTRAS

Extraer la muestra siempre mayor que la cantidad requerida para el ensayo. De acuerdo al ensayo que se realizará se debe reducir el material por cualquier de los dos procedimientos existentes que se detallan en la norma ASTM C-702 Y AASHTO T248.

Donde detalla el procedimiento de un cuarteo manual y mecánico, para la reducción de muestras de suelos y árido en general. Para realizar los distintos ensayos del agregado pétreo, del proyecto, la reducción de muestras se realizó con el cuarteador mecánico siguiendo los procedimientos descritos en la normas citadas anteriormente, porque se obtienen mejores resultados.



Figura 14: Cuarteo Mecánico de los Agregados

Fuente: Elaboración propia

4.6 ENSAYOS REALIZADOS A LOS MATERIALES PÉTREOS

Se realizó los siguientes ensayos a los agregados pétreos:

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	ESPECIFICACIONES		AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
	ABC	ASTM	GRAVA 3/4"	GRAVILLA 3/8"	ARENA	FILLER
PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS o VOLUMÉTRICAS						
Peso específico y Absorción del agregado Grueso.	A0519	C127	✓	✓		
Peso específico y Absorción del agregado Fino	A0520	C128			✓	
PROPIEDADES EN CONSENSO						
Análisis granulométrico del agregado pétreo	A0506	C136	✓	✓	✓	
Porcentaje de caras producidas por fractura (Angularidad del agregado pétreo)	A0508	D5821	✓	✓		
Partículas planas y alargadas		D4791	✓	✓		
Equivalente arena	A0509	D2419			✓	
PROPIEDADES DE ORIGEN						
Tenacidad (Desgaste de los Ángeles)	A0511	C131	✓	✓		

Tabla 10: Ensayos de Caracterización a los Agregados Pétreos

Fuente: Elaboración propia

4.6.1 ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS

4.6.1.1 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (ASTM E-127 AASHTO T85-91)

Este método establece los procedimientos para determinar el peso específico bruto (Gb) el peso específico saturado (Gbs), peso específico aparente (G) y el porcentaje de absorción del agregado grueso. Se pone a saturar la muestra por un lapso de 24 ± 4 h, para que las partículas absorban la mayor cantidad de agua que sea capaz de captar.

El procedimiento del ensayo de laboratorio consiste en determinar el peso de la muestra en condición seca y saturada superficialmente seca (SSS), para luego determinar el volumen por la diferencia de pesos

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

realizados al ambiente y sumergido al agua. Conocidos el volumen y peso se calcula el peso específico y absorción de agua de la muestra, para las diferentes condiciones realizadas.

Peso mínimo de la muestra de ensayo:

Tamaño Máximo Nominal [mm] [pulg.]	Peso Seco Mínimo de la Muestra de Ensayo [Kg]
12.5 (1/2") o menos	2
19.0 (3/4")	3
25.0 (1")	4
28.1 (1 1/2")	5
50 (2")	8
63.0 (2 1/2")	12

Tabla 11: Peso Seco Mínimo Para el Ensayo de Peso específico – Agregado Grueso.

Fuente: Guía de Laboratorio, Cerruto A. Fernando, 2009

Para el proyecto se determinaron los siguientes datos de peso específico y absorción del agregado.

ENSAYO DE PESOS ESPEFICOS Y ABSORCIÓN	
ENSAYO	VALOR OBTENIDO
GRAVA	
PESO ESPECIFICO SECO PROMEDIO	2.660
ABSORCION PROMEDIO EN (%)	1.110
GRAVILLA	
PESO ESPECIFICO SECO PROMEDIO	2.635
ABSORCION PROMEDIO en %	1.591

Tabla 12: resultados de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

Fuente: Elaboración propia



Figura 15: Ensayo de Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.2 PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO (ASTM E-128, AASHTO T84)

Este método establece los procedimientos para determinar el peso específico y el porcentaje de absorción del agregado fino. Se pone a saturar la muestra por un lapso de 24 ± 4 h, para que las partículas absorban la mayor cantidad de agua como se hizo para el agregado grueso.

El procedimiento del ensayo de laboratorio consiste en determinar el peso de la muestra en condición seca y saturada superficialmente seca (SSS) utilizando un matraz o picnómetro para realizar el ensayo. Se determina su volumen por el peso del agua desplazada por el agregado sumergido en un matraz aforado.

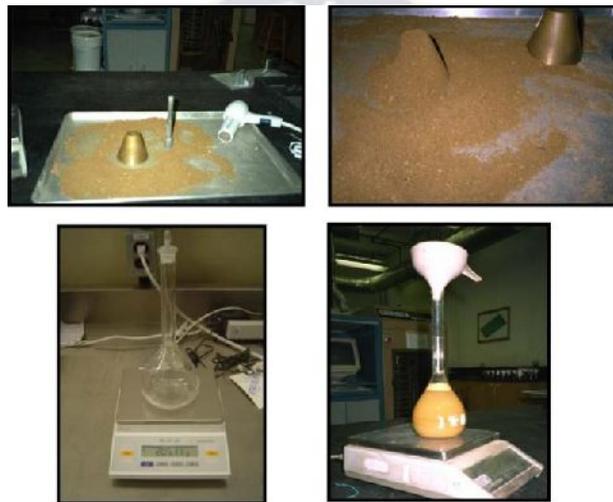


Figura 16: Peso Específico y Absorción en Agregados Finos

Fuente: Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica (Publicación Técnica No 299).

El peso mínimo requerido de la muestra para realizar el ensayo se puede obtener de la tabla 11.

Para el proyecto se determinaron los siguientes datos de peso específico y absorción del agregado fino.

ENSAYO DE PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCIÓN	
ENSAYO	VALOR OBTENIDO
PARTE FINA GRAVILLA (PASA TAMIZ N°4)	
PESO ESPECIFICO SECO PROMEDIO	2.480
ABSORCION PROMEDIO EN (%)	2.655
ARENA NATURAL	
PESO ESPECIFICO SECO PROMEDIO	2.562
ABSORCION PROMEDIO en %	2.144

Tabla 13: Resultados de Peso Específico y Absorción del Agregado Fino

Fuente: Elaboración propia

4.6.2 ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES EN CONSENSO

4.6.2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO PÉTREO

El proceso consiste en cribar el material de cada corte, por las mallas correspondientes especificadas en la norma ASTM y AASHTO tanto para el material grueso y fino, expresados en porcentaje del peso total, previo pesado del material retenido en cada tamiz, y estos tamices tiene aberturas que se hacen progresivamente más pequeñas.

Peso mínimo de la muestra de ensayo:

Tamaño Máximo Nominal [Mm] [Pulg.]	Peso Mínimo de la Muestra de Ensayo [Kg]
25.00 (1")	10
19.00 (3/4")	5
12.50 (1/2")	2
9.50 (3/8")	1
Arena	0.5

Tabla 14: Pesos Mínimos de la Muestra Para el Ensayo de Granulometría.

Fuente: Guía de laboratorio, Cerruto A. Fernando, 2009.

La siguiente figura muestra la granulometría de los agregados pétreos que se obtuvieron para el proyecto, después de cribar el material por los tamices especificados en la norma.

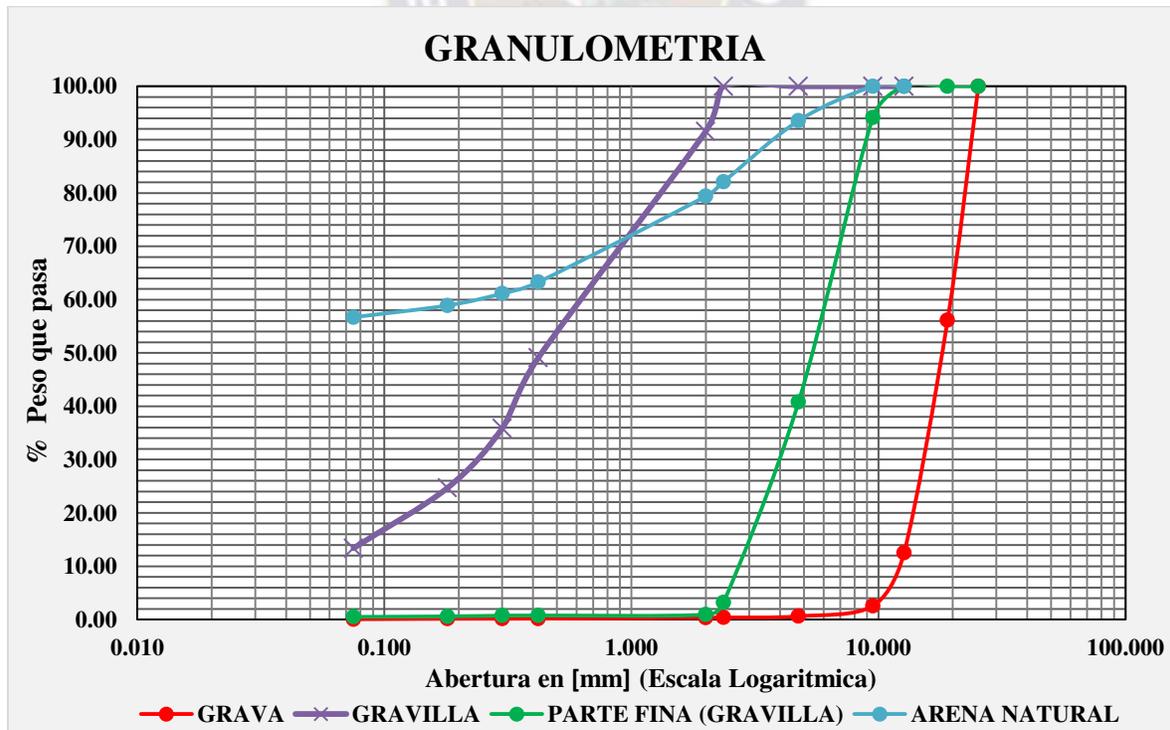


Figura 17: Granulometría de los Agregados Pétreos

Fuente: Elaboración propia



Figura 18: Ensayo de la Granulometría de los Agregados Pétreos

Fuente: Elaboración propia

4.6.2.2 PORCENTAJE DE CARAS PRODUCIDAS POR FRACTURAS

Mediante este ensayo se establece el procedimiento para determinar el contenido porcentual de agregados pétreos que presentan una o más caras producidas por fractura (chancadas, rodadas).

La muestra se separa por fracciones como se muestra en la siguiente tabla y la cantidad mínima de cada fracción para realizar el ensayo:

Tamices [mm] [pulg]		Peso de las fracciones [kg]
Pasa	Retenido	
50.00 (2")	37.50 (1 ½")	5.0
37.50 (1 ½")	25.00 (1")	4.0
25.00 (1")	19.00 (¾")	1.0
19.00 (¾")	12.50 (½")	0.7
12.50 (½")	9.50 (3/8")	0.3
9.50 (3/8")	4.75 (Nº4)	0.25

Tabla 15: Preparación de la muestra. Ensayo de Angularidad.

Fuente: Guía de laboratorio, Cerruto A. Fernando, 2009.

Cada fracción se determina visualmente. El ensayo consiste en pesar una fracción de muestra seca registrarla y esparcirla sobre una superficie limpia y por simple inspección seleccionarlas agrupándolas en partículas de caras fracturadas que no ofrezcan dudas de su apariencia y las que presentan caras dudosas, el mismo procedimiento se realiza para cada fracción. Se ensayarán las fracciones de la grava siempre que el porcentaje retenido parcial, sea igual o mayor que 5%. En caso contrario la fracción no se ensayará, lo que debe considerarse en el cálculo de resultados.

Las partículas irregulares y angulares generalmente resisten el desplazamiento (movimiento) en el pavimento, debido a que tienden a entrelazarse cuando son compactadas. El mejor entrelazamiento se produce generalmente con partículas de bordes puntiagudos y de forma cúbica, producidas, casi siempre, por trituración.



Figura 19: Ensayo de Caras Producidas por Fracturas

Fuente: Elaboración propia

La existencia de caras fracturadas, producidas por chancado o machaqueo en mezclas asfálticas, asegura un alto grado de fricción interna entre las partículas, ya que con ellas aumenta la resistencia al ahuellamiento, manteniendo la estabilidad necesaria, aumentan la textura y fricción en las superficies de los pavimentos.

Los resultados del ensayo se muestran en la siguiente tabla:

PARTÍCULAS CARAS FRACTURADAS	
Material	% Part. Fracturadas
Grava 3/4"	48.62
Gravilla 3/8"	58.17

Tabla 16: Resultados de Partículas Caras Fracturadas

Fuente: Elaboración propia

4.6.2.3 PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS (ASTM-D4791)

Mediante este ensayo se determina el contenido de partículas planas y alargadas en los agregados gruesos (grava, gravilla).

Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio. Para el propósito de esta prueba, la dimensión promedio se define como el tamaño medio entre las dos aberturas: 3/4" a 1/2"; 1/2" a 3/8"; etc. Entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados.

El procedimiento consiste en cribar el material de la muestra por una serie de tamices y mediante cuarteo obtener los pesos para las muestras de cada fracción de acuerdo a la tabla anterior del ensayo de caras fracturadas. Cada fracción se determina visualmente, y de la fracción

correspondiente, con un calibrador de espesores se determina la masa de la fracción laja y sin laja.



Figura 20: Ensayo de Partículas Planas y Alargadas

Fuente: Elaboración propia

Para el proyecto se determinaron los siguientes porcentajes de caras fracturadas de los agregados pétreos utilizados:

PARTÍCULAS PLANAS Y ALARGADAS	
Material	% Part. Planas y Alarg.
Grava 3/4"	12.30
Gravilla 3/8"	1.60

Tabla 17: Porcentajes de Partículas Planas y Alargadas del Agregado

Fuente: Elaboración propia

4.6.2.4 EQUIVALENTE ARENA DEL AGREGADO FINO (ASTM D2419)

Mediante este método de ensayo se determina bajo condiciones normales las proporciones relativas de arcilla o finos plásticos y polvo en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz 4.75 μm (N°4).

El término “Equivalente Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas que son deseables y generalmente finos plásticos y/o polvo que son indeseables.

El procedimiento del método consiste en colocar una muestra de arena seca y solución dispersante en una probeta de plástico graduada, que luego de realizar maniobras resolventes y agitadoras, separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un periodo de tiempo en reposo, se pueden leer las alturas o niveles de arcilla y arena en la probeta. El equivalente arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje.

Después de dejar sedimentar durante 20 min, se miden las alturas de los finos susceptibles y el agregado sedimentado. La relación de alturas hace que sea aceptado el valor mayor de 45%.

$$EA = \frac{N_a}{N_t} * 100$$

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 18.

EQUIVALENTE ARENA			
Muestra No.	1	2	
Nivel Superior	5.3	4.7	
Nivel Inferior	4.0	4.2	
Equivalente de Arena E.A.	75.5	89.4	
E. A. Promedio (%)	82.4		

Tabla 18: Resultados de Ensayo de Equivalente Arena

Fuente: Elaboración propia

4.6.3 ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES DE ORIGEN

4.6.3.1 RESISTENCIA AL DESGATE POR ABRASIÓN E IMPACTO EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES (ASTM E-131, AASHTO T96)

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los agregados mayores a 2.36 mm, mediante la máquina de los ángeles.

El ensayo de los Ángeles tiene por objeto determinar la degradación de los agregados, resultante de una combinación de acciones que incluyen la abrasión o desgaste, impacto y trituración en un tambor rotatorio de acero que contiene un número especificado de esferas de acero, el cual depende de la granulometría de la muestra de ensayo, que puede determinarse de la siguiente tabla.

Tamaño del Tamiz, mm (Pulg)		Gradación y Peso de la Muestra, g			
Pasa	Retenido	A	B	C	D
38.1(1½")	25.0(1")	1250±25			
25.0(1")	19.0(¾")	1250±25			
19.0(¾")	12.5(½")	1250±25	2500±25		
12.5(½")	9.5(3/8")	1250±25	2500±25		
9.5(3/8")	6.3(¼")			2500±25	
6.3(¼")	4.75(Nº 4)			2500±25	
4.75(Nº 4)	2.36(Nº 8)				5000±10
TOTAL, gramos		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Número de Esferas		12	11	8	6
Nº Revoluciones (30-33 r.p.m.)		500	500	500	500
Peso de la Carga		500±25	500±25	500±25	500±25

Tabla 19: Gradación y Peso de la Muestra.

Fuente: Guía de Laboratorio, Cerruto A. Fernando, 2009

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Su procedimiento consiste en colocar en una maquina rotatoria (máquina de los Ángeles), muestra de agregado a ensayar en función a la composición granulométrica, esferas de acero en función a la carga abrasiva requerida y sometida a giro por 500 revoluciones, posteriormente se extrae la muestra, se lava en un tamiz de corte y se seca al horno hasta peso constante. Posteriormente por diferencia de peso se determina el porcentaje de perdida de agregado.



Tabla 20: Ensayo de Desgaste en la Máquina de los Ángeles

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la granulometría para este ensayo es de gradación B correspondiente a 11 esferas de carga abrasiva y se determinaron los siguientes datos del ensayo:

DESGASTE DE LOS ANGELES	
	Peso
Peso Total	5003.9
Retenido tamiz N° 12	4022.5
Desgaste %	19.6

Tabla 21: Resultados Resistencia al Desgaste por Abrasión

Fuente: Elaboración propia

4.6.4 ESPECIFICACIONES

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS	NORMA ASTM	AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
		MIN [%]	MAX [%]	MIN [%]	MAX [%]
PROPIEDADES DE CONSENSO					
Análisis Granulométrico del Agregado (*)	C 136				
Angularidad del agregado grueso (Caras Fracturadas)	D5821	40.00			
Partículas alargadas y planas	D4791		20.00		
Equivalente arena	D2419			45.00	

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS
CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)**

PROPIEDADES DE ORIGEN					
Tenacidad (Desgaste de los Ángeles)	C131			40.00	

Tabla 22: Especificaciones de los Agregados Según la Norma ASTM D3515

Fuente: Elaboración propia

(*) El análisis granulométrico se estudiará más adelante a detalle, verificando las especificaciones.

4.7 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÁRIDOS

La siguiente tabla muestra en resumen los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los agregados pétreos y la especificación correspondiente a cada ensayo, los cuales cumplen las especificaciones, establecidas en las normas.

DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN			RESULTADOS	OBS.
	ASTM	MIN.	MAX.	[%]	
PROPIEDADES GRAVIMÉTRICAS O VOLUMÉTRICAS					
Peso Específico					
grava	ASTM C127	-	-	2.660	
Gravilla				2.635	
parte fina gravilla (pasa Tamiz N°4)	ASTM C128	-	-	2.480	
arena natural				2.562	
Absorción					
grava	ASTM C127	-	-	1.110	
Gravilla				1.591	
gravilla parte fina (pasa Tamiz N°4)	ASTM C128	-	-	2.655	
arena natural				2.144	
PROPIEDADES EN CONSENSO					
Angularidad (Caras Fracturadas)					
Grava	ASTM D5821	40		48.62	Cumple
Gravilla				58.17	Cumple
Partículas Planas y Alargadas					
Grava	ASTM D4791		20	12.30	Cumple
Gravilla				1.60	Cumple
Equivalente Arena	ASTM D2419	45		82.4	Cumple
PROPIEDADES DE ORIGEN					
Tenacidad(Desgaste De Los Ángeles)					
Grava	ASTM C131		40	19.60	Cumple
Gravilla				20.7	Cumple

Tabla 23: Resumen de los Resultados de Ensayo a los Agregados Pétreos

Fuente: Elaboración propia



CAPÍTULO V

**ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL
CEMENTO ASFÁLTICO
CONVENCIONAL Y MODIFICADO**

5 CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADO

5.1 INTRODUCCIÓN

Para realizar un diseño adecuado del concreto asfáltico es necesario conocer sus propiedades del bitumen, realizar una caracterización para determinar su comportamiento reológico y propiedades físico mecánicas. Estas deben cumplir con los requisitos mínimos de calidad según las especificaciones de las normas AASHTO y ASTM.

Para el diseño de mezclas asfálticas del proyecto se realizó la caracterización correspondiente del cemento asfáltico convencional y modificado, los datos obtenidos en laboratorio y las planillas de cálculo de muestran en anexos.

5.2 PROCEDENCIA DEL CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico utilizado para el proyecto es de procedencia colombiana Ecopetrol (60-70) obtenida y proporcionada de la empresa COINSER ubicado en la ciudad de El Alto el cual ha sido sometido a rigurosas pruebas de calidad cuyos resultados se encuentran en anexos.

La investigación y la caracterización del cemento asfáltico se realizaron en el laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales I.E.M.-U.M.S.A., con la supervisión de los ingenieros y técnicos del laboratorio.

5.3 EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

La extracción de materiales bituminosos, se realizan con un extractor que permite sacar el material a distintas profundidades del tanque de almacenamiento. Para el proyecto la extracción se hizo de acuerdo a la norma (ASTM D140, AASHTO T40) el cual establece los procedimientos de extracción de la muestra. Esta debe ser representativa y una vez extraída la muestra se identifica adecuadamente, la extracción de muestras se realizó en recipientes metálicos cerrados evitando cualquier tipo de contaminación.



Figura 21: Extracción e Identificación de la Muestra

Fuente: Elaboración propia

En laboratorio, para la realización de los distintos ensayos se hizo la preparación de muestras en recipientes más pequeños metálicos (latas de leche) ver figura, es una manera práctica para que ésta caliente rápido, desde luego se homogeniza adecuadamente según los procedimientos de las normas ASTM y AASHTO teniendo cuidados correspondientes como: recalentado de la muestra, homogenización, entre otros.

5.4 MODIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL CON MATERIAL DE DESECHO (BUMPER)

Para la modificación del cemento asfáltico existen dos procesos: una modificación por vía seca y la otra que es un proceso por vía húmeda.

La modificación para el proyecto se realizó mediante el proceso húmedo donde el material modificante es mezclado con cemento asfáltico a una temperatura, en este caso a 170 °C y consiguiendo la correcta homogenización en la modificación, y así mediante diversos pasos se obtuvo un asfalto modificado.

La modificación del cemento asfáltico se realizó con la incorporación de material de desecho proveniente de parachoques de automóviles (bumper) de la siguiente manera:

5.4.1 OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE MATERIAL DE DESECHO (BUMPER)

El material de desecho proveniente de parachoques de vehículos se obtuvo de las diversas chaperías que existen en la ciudad de El Alto, y de Toyosa (importadora de vínculos) ubicado en la ciudad de La Paz donde tiene acopiado estos materiales cada vez en mayor cantidad.

En el proceso de la modificación del cemento asfáltico, el material modificante cualquiera que sea esta, debe estar reducido a un tamaño adecuado menor a la malla N° 16, mientras más pequeños sean las partículas del modificante es mejor la modificación.

Para reducir el material modificante (parachoques proveniente de vehículos) requerido para este proyecto, se tuvo que optar a raspar el bumper y luego tamizar por la malla N°16 y pesar las cantidades necesarias para los siguientes porcentajes 1.5%, 2.0% y 3.0% respectivamente.



Figura 22: Preparación de Material de Desecho

Fuente: Elaboración propia

Las cantidades necesarias del cemento asfáltico para los distintos porcentajes de modificación se realizaron de la siguiente manera:

- ❖ Se preparó y se registró los pesos de los recipientes metálicos para los porcentajes correspondientes y la identificación de la misma, posteriormente se calienta el cemento asfáltico.
- ❖ Posterior a ello se vació el cemento asfáltico en los recipientes identificados aproximadamente la cantidad necesaria para la modificación, y se dejó enfriar.
- ❖ Una vez enfriado la muestra se procedió a pesar y registrar el peso correspondiente, obtenido el peso del cemento asfáltico se realizó el cálculo de la cantidad de material modificante requerido para los distintos porcentajes.

5.4.2 EQUIPOS UTILIZADOS



Figura 23: Equipo Utilizado Para la Modificación del Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura el equipo utilizado fue instalado para la modificación correspondiente de manera casera contando con un calentador, taladro de la marca Bosch y brocas elaboradas tipo aspa y aspa de corte para obtener un mejor resultado mediante la homogenización adecuada.

5.4.3 PROCESO DE MODIFICACIÓN

Una vez instalado el equipo se calentó la muestra a una temperatura de 170 °C sobre una hornilla y se procedió a modificar el cemento asfáltico incorporando bumper, para el mezclado se utilizó las herramientas de corte y cola de pato intercalando durante un periodo de 2.5 horas teniendo

cuidado de mantener la temperatura constante con un termómetro graduado, pues mayores a 170 °C se quema el asfalto.



Figura 24: Modificación del Asfalto

Fuente: Elaboración propia

Una vez terminada la modificación se muestrea en recipientes metálicos con el objetivo de reducir la muestra en pequeñas cantidades para poder realizar los ensayos correspondientes aprovechando que el material esta homogenizado y caliente, posterior a ello se dejó enfriar al ambiente durante 24 horas.

Los datos obtenidos y las planillas de cálculo así como la caracterización del asfalto modificado se muestran en anexos.

5.5 ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADOS

Para realizar el análisis y evaluación del cemento asfáltico tanto el convencional y modificado en este proyecto, ambos fueron sometidos a los siguientes ensayos para su caracterización:

Descripción de Los Ensayos	Método Utilizado	C.A. Convencional	Asfalto Modificado
Peso Específico [gr/cm ³]	ASTM D - 70	✓	✓
Penetración a 77 °F (25°C) 100 g 5 s [0,1 mm]	ASTM D - 5	✓	✓
Punto de Inflamación (Vaso abierto de Cleveland) [°C]	ASTM D1310	✓	✓
Ductilidad de 77 °F (25°C) 5 cm/min. [cm]	ASTM D - 113	✓	✓
Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]	ASTM D - 36	✓	✓
Solubilidad en tricloroetileno [%]	ASTM D 2042	✓	
Viscosidad Cinemática a 135°C [cSt]	ASTM D - 2170		
Viscosidad Dinámica a 60°C [P]	ASTM D - 2171		

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Ensayo sobre la Película Delgada	Perdida por Calentamiento [%]	ASTM D-1754	✓	✓
	Penetración [%] min. del Original	ASTM D-5	✓	✓
	Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]	ASTM D-36	✓	✓
Ensayo de la Mancha		AASHTO T-102	✓	✓
Viscosidad Rotacional Brookfield, 135°C (cP)		ASTM D-4402	✓	✓
Viscosidad Rotacional Brookfield, 155°C (cP)		T72 D88	✓	✓
Viscosidad Rotacional Brookfield, 177°C (cP)		T72 D88	✓	✓
Punto De Fragilidad Fraass		IP 80-53	✓	✓
Ensayo De Película Delgada Rotatoria (RTFOT)		ASTM D-2872		✓
Ensayo de Recuperación Elástica		AASHTO T301	✓	✓
Estabilidad al Almacenamiento				✓

Tabla 24: Ensayos Para la Caracterización de los Cementos Asfálticos Modificados y No Modificados

Fuente: Elaboración propia

5.5.1 PESO ESPECÍFICO (ASTM D70-76, AASHTO T228-90)

Este método establece el procedimiento para determinar la densidad de los asfaltos mediante el uso de picnómetro a una temperatura requerida, que generalmente es 25°C.

El procedimiento consiste en calibrar el recipiente (picnómetro) posteriormente se realiza el ensayo diluyendo el material asfáltico por medio de calor y vertiéndola hasta la mitad del picnómetro y enfriarla para luego llevar al baño maría a 25°C por un lapso de 30 minutos, y finalmente se calcula el peso específico mediante las ecuaciones descritas en las normas ASTM y AASHTO.



Figura 25: Ensayo de Peso Específico

Fuente: Elaboración propia

Este ensayo es un parámetro fundamental del asfalto, utilizado para la venta de asfalto y el cálculo de masa - volumen en los tanques de almacenamiento, ya que permite estimar el volumen vendido de asfalto.

5.5.2 ENSAYO DE PENETRACIÓN DE MATERIALES BITUMINOSOS A 25°C (ASTM D5)

Este método es muy empleado para cuantificar la consistencia o dureza relativa del asfalto, también utilizada para caracterizar asfaltos por grado de penetración. En general asfaltos blandos tendrán penetraciones mayores que los más rígidos.

Su procedimiento consiste en fundir la muestra, y colocar en un recipiente apropiado, inicialmente enfriada a temperatura ambiente, y finalmente colocada en un baño maría a temperatura controlada. Después de un determinado tiempo la muestra es sometida a la penetración, con una aguja y equipo estandarizados para este ensayo.

A no ser que se especifique otra indicación, se efectúa el ensayo a 25°C con 100 g durante un lapso de 5 segundos.



Figura 26: Ensayo de Penetración

Fuente: Elaboración propia

En la tabla siguiente se muestra los datos obtenidos en el laboratorio del ensayo de penetración para ambos asfaltos:

RESULTADOS DEL ENSAYO DE PENETRACIÓN				
Muestra	Asfalto Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
1	72	54	49	47
2	71	55	49	49
3	72	53	48	48
PROMEDIO	72	54	48	48

Tabla 25: Resultados, Ensayo de Penetración de Ambos Asfaltos

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis y comparación técnica de los resultados tenemos lo siguiente:

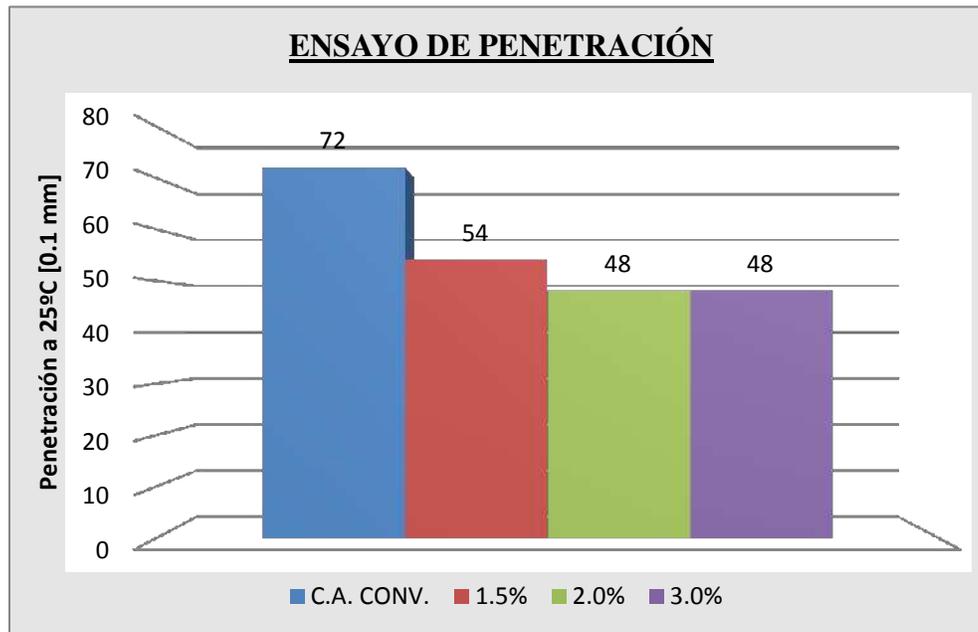


Gráfico 1: Ensayo de Penetración

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al gráfico con la incorporación del modificante proveniente de parachoques de automóviles (bumper), la penetración disminuye entonces aumenta la rigidez del asfalto convencional en estudio.

5.5.3 ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN Y COMBUSTIÓN (AASHTO T79-96, ASTM D1310 – 01)

La prueba de punto de inflamación es un parámetro muy importante como consideración de almacenaje y transporte, esta indica la temperatura mínima a la cual el asfalto empieza a generar vapores potencialmente inflamables, generando así riesgos de fuego. Además, con el fin de mantener su viscosidad lo suficiente baja para que el material pueda ser bombeado cuando se calienta la misma en su almacenamiento.

El punto de inflamación, de un cemento asfáltico es la temperatura más baja a la cual se separan materiales volátiles de la muestra, y crean un destello en presencia de una llama abierta.

El punto de combustión, es la temperatura en que la muestra, después de la inflamación por el paso de la llama piloto, continúa quemándose por un tiempo de 5 segundos como mínimo.

Su procedimiento del método consiste en calentar la muestra vertiéndola al recipiente de vaso abierto de Cleveland hasta el nivel indicado, posteriormente se inicia el ensayo calentado a una velocidad de temperatura de 5°C por minuto, se aplica la llama piloto en intervalos de 2°C.

Cuando aparece el centello en cualquier punto de la superficie de la muestra se registra la temperatura como punto de inflamación y para el punto de combustión se continúa calentando hasta que llama permanezca encendido durante 5 segundos y se registra la temperatura.



Figura 27: Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos del ensayo de punto de inflamación y combustión se muestran en la siguiente tabla:

ENSAYO DE PUNTO DE INFLAMACIÓN (VASO ABIERTO DE CLEVELAND) [°C]				
Punto De:	Asfalto Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
Inflamación [°C]	243	233	234	234
Combustión [°C]	306	308	310	311

Tabla 26: Resultados del Ensayo de Punto de Inflamación y Combustión

Fuente: Elaboración propia

5.5.4 DUCTILIDAD DE MATERIALES BITUMINOSOS (ASTM 113, AASHTO T51-00)

La prueba de ductilidad a los aglomerantes bituminosos es importante, porque mide la capacidad del asfalto a la elongación antes de romperse, bajo condiciones controladas. Los asfaltos dúctiles tienen normalmente mejores propiedades aglomerantes. Por otra parte, asfaltos con una ductilidad muy elevada son usualmente susceptibles a los cambios de temperatura y por lo tanto a la deformación.

Este ensayo además nos proporciona una idea acerca de la edad del asfalto mismo, que si se rompe a valores menores a los establecidos nos indica que es un asfalto viejo y que ha perdido

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

sus características, por consecuencia puede provocar grietas en la carpeta, manifestándose como un asfalto crackeado.

El ensayo consiste en calentar la muestra hasta que esté lo suficientemente fluida para verterlo en los moldes de bronce cuyas dimensiones están normalizadas. Posterior a ello se deja enfriar a temperatura ambiente durante 30 a 40 min, sumergiéndola a continuación en baño maría por un periodo de 85 a 95 min, posteriormente son colocados en el equipo de ductilómetro el cual cuenta con baño maría, para mantener la temperatura durante el ensayo, finalmente se mide la longitud a la cual se rompe la muestra.



Figura 28: Ensayo de Ductilidad

Fuente: Elaboración propia

Mediante el ensayo realizado en el laboratorio se determinaron los siguientes datos, de las muestras ensayadas:

ENSAYO DE DUCTILIDAD a 77 °F (25°C) 5 cm/min.				
Unidad	Asfalto Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
[cm]	150	61.8	42.8	28.4

Tabla 27: Resultados del Ensayo de Ductilidad

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis y comparación técnica se observa que a mayor cantidad de porcentaje de incorporación de modificante en el cemento asfáltico en estudio, disminuye su elongación, el cual se muestra en el grafico siguiente:

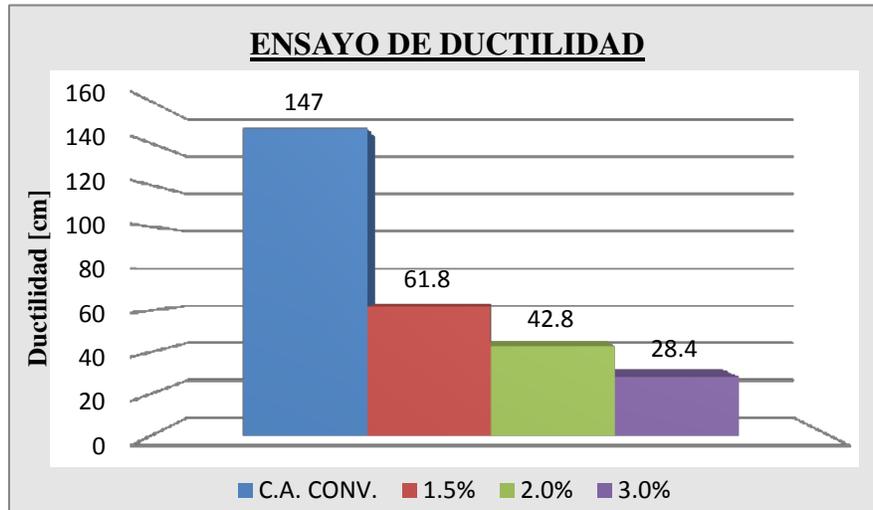


Gráfico 2: Ensayo de Ductilidad

Fuente: Elaboración propia

5.5.5 ENSAYO DE PUNTO DE ABLANDAMIENTO (EQUIPO ANILLO Y BOLA) (ASTM D36, AASHTO T53)

Este método describe el procedimiento para la determinación del punto de ablandamiento de cementos asfálticos dentro del rango de 30°C a 175°C por medio del aparato de anillo y bola.

El punto de ablandamiento (anillo y bola) es la temperatura leída en el momento en que una esfera metálica estándar haya atravesado un anillo también estándar con muestra, perfectamente lleno con el material asfáltico y toca una placa de preferencia después de haber recorrido una distancia de 25.4mm., de acuerdo a las condiciones especificadas.



Figura 29: Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo Y Bola)

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron los siguientes resultados del ensayo de punto de ablandamiento:

Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola) a 77 °F (25°C)	
C.A. Convencional 60/70 [°C]	47.5
C.A. Modificado Con 1.5% Bumper [°C]	52.2
C.A. Modificado Con 2.0% Bumper [°C]	54.2
C.A. Modificado Con 3.0% Bumper [°C]	55.8

Tabla 28: Resultados de Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola)

Fuente: Elaboración propia

El análisis y comparación técnica de los resultados se refleja en el siguiente gráfico:

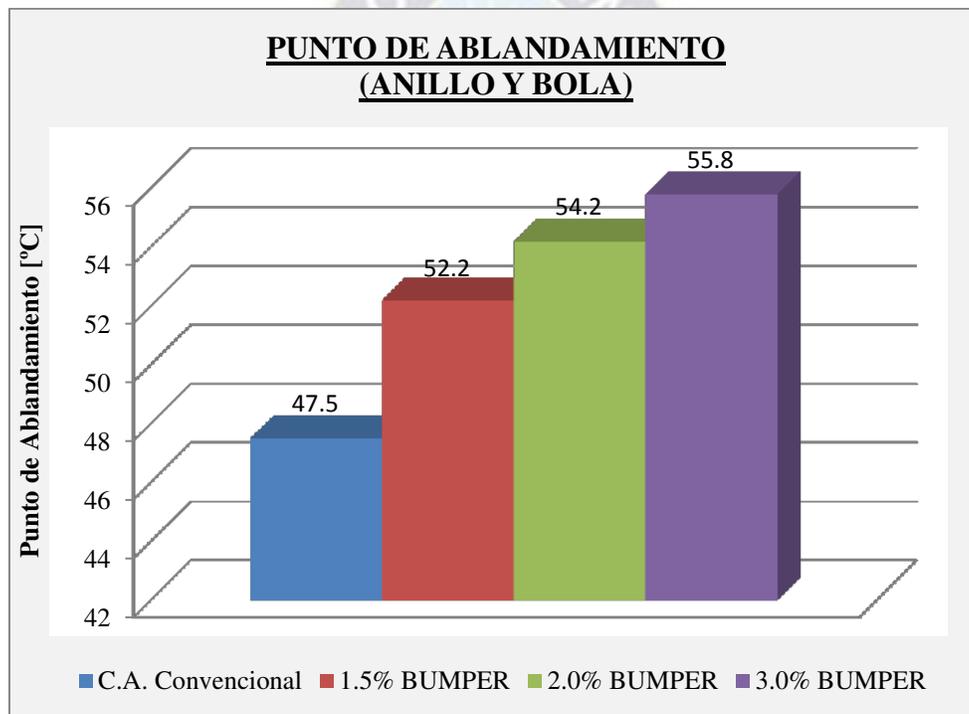


Gráfico 3: Ensayo de Punto de Ablandamiento (Anillo y Bola)

Fuente: Elaboración propia

5.5.6 SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO (ASTM D2042-94, AASHTO T44-97)

Este método de ensaye se aplica para determinar el grado de solubilidad en solventes orgánicos de materiales bituminosos usados en caminos tales como el alquitrán y asfalto del petróleo, tengan o no una pequeña cantidad de materia mineral.

El procedimiento del ensayo consiste en la disolución de la muestra en tricloro-etileno y filtrado a través de un papel filtro. El material retenido, que corresponde al material insoluble, es lavado

secado y pesado, posteriormente se calcula el porcentaje de material soluble y material insoluble, y se debe tener las precauciones necesarias en el manejo de los reactivos tal como especifica norma.



Figura 30: Ensayo de Solubilidad en Tricloroetileno

Fuente: Elaboración propia

El asfalto en estudio dio como resultado lo siguiente:

Solubilidad en Tricloroetileno	
C.A. Convencional	99.60 [%]

Tabla 29: Resultado del Ensayo de Solubilidad en Tricloroetileno

Fuente: Elaboración propia

5.5.7 PELÍCULA DELGADA (ASTM D1754, AASHTO T179), PELÍCULA DELGADA ROTATORIA (RTFOT) (ASTM D2872, AASHTO T240)

Estos métodos describen los procedimientos para determinar el efecto del calor y aire sobre materiales asfálticos semisólidos, el cual expone una muestra de asfalto a unas condiciones que aproximan las ocurridas durante las operaciones de plantas de mezclado en caliente.

Ambos métodos indican la susceptibilidad aproximada de la dureza o pérdida de la ductilidad del cemento asfáltico, durante el mezclado en una mezcladora a una temperatura cercana a los 150°C, el endurecimiento en el mezclador y el cambio en la ductilidad, deben ser menores que el cambio en el horno; si se usa una mayor temperatura de mezclado, cambios mayores pueden ocurrir en la dureza y ductilidad. Estos ajustes incluyen mezclar el asfalto con el agregado a la temperatura más baja posible, y durante el tiempo más corto que pueda obtenerse en la práctica.

Las pruebas de viscosidad y/o penetración efectuada sobre las muestras obtenidas después de los ensayos TFOT y/o RTFOT, son usadas para medir el endurecimiento anticipado, durante la construcción y durante el servicio del pavimento.

5.5.7.1 PELÍCULA DELGADA GIRATORIA

El procedimiento de la película delgada rotatoria TFOT consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico (50 ± 0.5 g), en un platillo de fondo plano y registrar los pesos.



Figura 31: Preparación de Muestras Película Delgada TFOT

Fuente: Elaboración propia

La muestra y el platillo se colocan en un plato rotatorio dentro de un horno, a la velocidad de (5 a 6 rpm), manteniendo una temperatura de 163°C (325°F) por cinco horas. Enseguida se ensaya la muestra envejecida y endurecida artificialmente, para determinar el valor de penetración, punto de ablandamiento, y otras pruebas según el requerimiento de las especificaciones a utilizar.



Figura 32: Ensayo de Película Delgada Giratoria

Fuente: Elaboración propia

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Los datos obtenidos del laboratorio sobre los ensayos realizados al residuo de la película delgada son los siguientes:

ENSAYO SOBRE LA PELÍCULA DELGADA	
Ensayo	Valores Obtenidos
Perdida por Calentamiento [%]	0.106
Penetración [%] min. del Original	67
Ductilidad a 25°C del residuo [cm]	68
Punto de Ablandamiento (prom.) [°C]	53.8

Tabla 30: Resultados Obtenidos Sobre el Residuo de la Película Delgada

Fuente: Elaboración propia

5.5.7.2 PELÍCULA DELGADA ROTATORIA (RTFOT)

El procedimiento de este ensayo consiste en colocar una cantidad exacta de cemento asfáltico ($35 \pm 0,5$ g), en cada uno de los contenedores de vidrio requeridos, y llevado al horno durante un tiempo de 75 min a 163°C, posterior a ello se vacía el residuo y se realiza los ensayos dentro de las 24 h de ejecutado el ensayo de película delgada rotatoria.



Figura 33: Ensayo de Película Delgada Rotatoria

Fuente: Elaboración propia

Resultados obtenidos del ensayo de película delgada rotatoria sobre el asfalto modificado:

Ensayo	ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA ROTATORIA		
	Asfalto Modificado		
	1.5%	2.0%	3.0%
Perdida por Calentamiento [%]	0.042	0.033	0.034
Penetración [%] min. del Original	67	73	69
Ductilidad a 25°C del residuo [cm]	-	-	-
Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]	61.2	63.0	65.2

Tabla 31: Resultados del Ensayo de Película Delgada Rotatoria

Fuente: Elaboración propia

El análisis y comparación técnica se refleja en el siguiente gráfico:

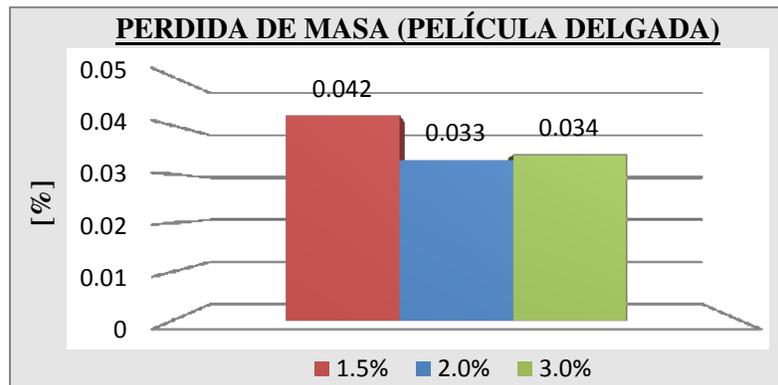


Gráfico 4: Perdida de Masa (Película Delgada)

Fuente: Elaboración propia

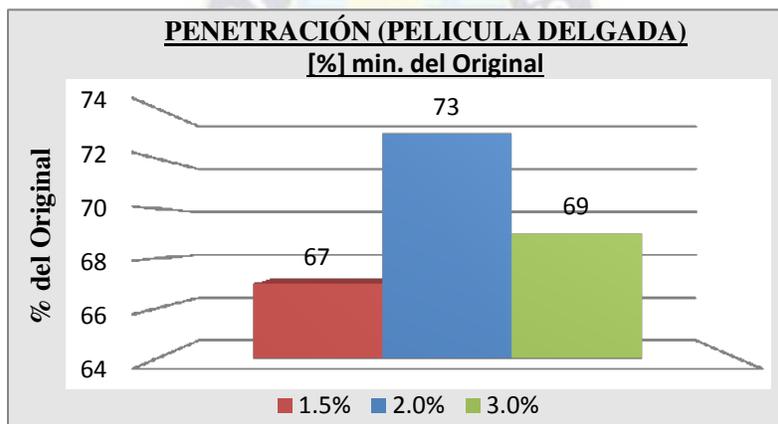


Gráfico 5: Penetración (Película Delgada)

Fuente: Elaboración propia

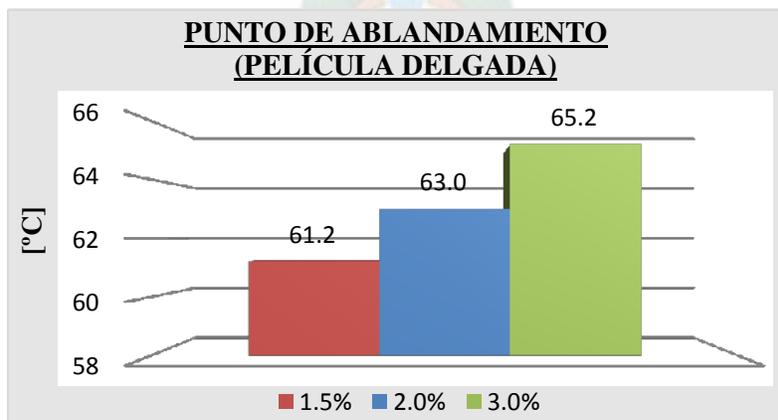


Gráfico 6: Punto de Ablandamiento (Película Delgada)

Fuente: Elaboración propia

5.5.8 ENSAYO DE LA MANCHA (AASHTO T102-83)

El ensayo de la mancha puede determinar la homogeneidad o no de los cementos asfálticos analizados.

Mediante este ensayo se ha tratado de preservar la calidad de los cementos asfálticos asegurando que los mismos no han sufrido sobrecalentamientos locales, ni durante el almacenamiento se ha producido material craqueado.

Esta prueba fue desarrollada para detectar residuos carbonosos en el asfalto producidos por sobrecalentamientos locales que conducen al craqueo del mismo. El producto procedente del craqueo constituye un sistema heterogéneo dentro del asfalto y precipita con el disolvente utilizado (xileno y heptano). Este ensayo es aplicable solo a productos de asfaltos derivados del petróleo.

Las consecuencias de un material craqueado son la pérdida de propiedades de adhesividad frente a los agregados y el mal comportamiento en pavimentos.



Figura 34: Ensayo de la Mancha

Fuente: Elaboración propia

5.5.9 VISCOSIDAD BROOKFIELD (ASTM D4402, AASHTO TP 48)

Este método describe el procedimiento para medir la viscosidad aparente del asfalto a temperaturas desde 60 a 200°C, usando un viscosímetro rotacional equipado con el sistema Thermosel.

La viscosidad del asfalto a altas temperaturas se mide para determinar si un cemento asfáltico puede ser manejado y bombeado en la refinería, terminal o planta asfáltica. Los valores medidos durante ese procedimiento se pueden utilizar para desarrollar diagramas temperatura – viscosidad, los que se utilizan para estimar las temperaturas de mezclado y compactación a utilizar, durante el diseño de las mezclas asfálticas en caliente.

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS CON MATERIAL PROVENIENTE DE PARACHOQUES DE VEHÍCULOS (BUMPER)

Se denomina viscosidad o coeficiente de viscosidad a la razón entre el esfuerzo de corte aplicado y la tasa de corte; es una medida de la resistencia del líquido a fluir.

El funcionamiento del viscosímetro brookfield se basa en el principio de la viscosimetría rotacional; mide la viscosidad captando el par de torsión necesario para hacer girar a velocidad constante un husillo inmerso en la muestra de fluido a estudiar. El par de torsión es proporcional a la resistencia viscosa sobre el eje sumergido, y en consecuencia, a la viscosidad del fluido.



Figura 35: Ensayo de Viscosidad Brookfield

Fuente: Elaboración propia

Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

ENSAYO DE VISCOSIDAD BROOKFIELD (cP)				
Temperatura [°C]	C.A. Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
135°C	300	758	793	938
155°C	162	208	240	290
175°C	68	83	99	125

Tabla 32: Resultados de la Viscosidad Brookfield

Fuente: Elaboración propia

La planilla de cálculo y obtención de datos en laboratorio del ensayo de viscosidad Brookfield se encuentran en anexos.

El análisis y comparación técnica de los resultados obtenidos de viscosidad Brookfield se muestra a continuación, donde se observa el comportamiento de la viscosidad por la adición de material modificante (bumper) con los porcentajes correspondientes, a medida que se incrementa el porcentaje de material de desecho al cemento asfáltico convencional la viscosidad de esta aumenta.

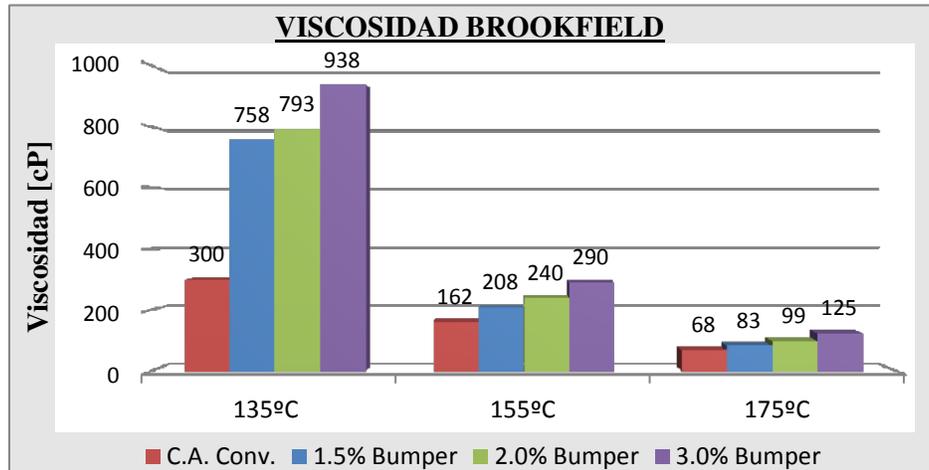


Gráfico 7: Viscosidad Brookfield

Fuente: Elaboración propia

5.5.10 ENSAYO DE PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS (IP 80-53)

El estudio de fragilidad es muy complicado y solo existen ensayos empíricos que permiten obtener una idea aproximada del comportamiento de cada tipo de asfalto, el ensayo más utilizado es el de Fraass.

Este método describe el procedimiento para determinar el punto de fragilidad de los materiales bituminosos de consistencia sólida o semisólida, por medio del aparato Fraass.

En el ensayo, una película del material adherida a una placa de acero inoxidable se somete, en condiciones especificadas, a ciclos sucesivos de flexión a temperaturas decrecientes. Entonces el punto de fragilidad corresponde a la temperatura a la cual, debido a la consistencia adquirida por el material asfáltico, se observa la primera fisura o rotura en la superficie de la película.



Figura 36: Ensayo de Punto de Fragilidad Fraass

Fuente: Elaboración propia

ENSAYO DE PUNTO DE FRAGILIDAD FRAASS				
Unidad	C.A. Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
[°C]	-19.5	-20.8	-22.3	-23.8

Tabla 33: Resultados de Punto de Fragilidad Fraass

Fuente: Elaboración propia

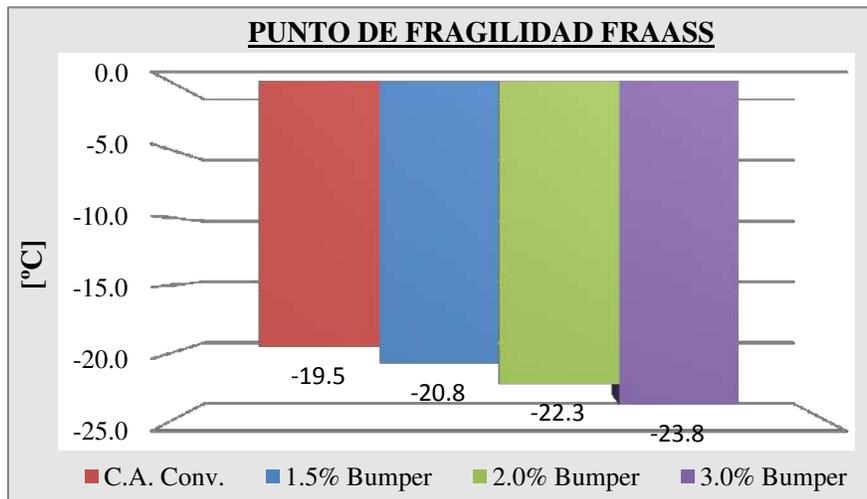


Gráfico 8: Punto de Fragilidad Fraass

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al gráfico mostrado anteriormente se observa que el punto de fragilidad Fraass aumenta a medida que se le va incrementando el material modificante proveniente de parachoques de vehículos (bumper).

5.5.11 ENSAYO DE RECUPERACIÓN ELÁSTICA (ASTM D6084-06, AASHTO T301-99)

Este método establece el procedimiento para medir la habilidad de un material de recuperarse después de una elongación, o la resistencia a una deformación permanente para lo cual se considera una elongación inicial de 20 cm. Con este ensayo se determina las propiedades elásticas de materiales asfálticos modificados.

El ensayo consiste en estirar una muestra de asfalto a una temperatura de 25 °C y una velocidad constante de 5 cm/min hasta un alargamiento predeterminado (20 cm). Una vez estirado la distancia correspondiente se realiza corte en el centro para obtener dos mitades (ver figura). Una vez transcurrido el tiempo de recuperación predeterminado se mide el acortamiento o recuperación de los cortes y se expresa como un porcentaje de la longitud del alargamiento. Este valor es aplicable en particular a los aglutinantes bituminosos modificados.



Figura 37: Ensayo de Recuperación Elástica

Fuente: Elaboración propia

RECUPERACIÓN ELÁSTICA				
Unidad	C.A. Convencional	Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
[%]	10.8	11.0	11.8	11.5

Tabla 34: Recuperación Elástica

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla la variación de la recuperación elástica es mínima casi nada, porque los valores rondan en ese rango.

5.5.12 ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO (NLT-328/91)

Es importante conocer que tan estable es el asfalto modificado al almacenamiento tanto para el fabricante como para el proceso constructivo, y el tiempo máximo de utilización del mismo, ya sea en tanque o su eventual traslado al proyecto de interés.

Este método permite determinar la estabilidad al almacenamiento, que a temperaturas elevadas puede producirse en los ligantes asfálticos modificados fenómenos de sedimentación o cremado, y en función de la densidad del material modificante esta puede suspenderse o decantarse.

El procedimiento consiste en calentar la muestra hasta que esté lo suficientemente fluida (bien homogenizada) y luego se vacía en los recipientes de almacenamiento y se cierra el recipiente, se lleva el conjunto al horno a una temperatura de 163 ± 2 °C por un tiempo de 120 horas (5 días). Después de los 5 días se extraen las muestras del almacenamiento en recipientes bien identificados tanto del nivel superior e inferior, posteriormente se realizan los ensayos correspondientes a ambas muestras como el ensayo de penetración, recuperación elástica y punto de ablandamiento.

Los resultados obtenidos se expresan como la diferencia entre las penetraciones y entre los puntos de ablandamiento.

Variación de penetración:

$$\Delta P = P_{\text{sup}} - P_{\text{inf}} (0,1\text{mm})$$

Variación del punto de ablandamiento:

$$\Delta P.A. = P.A_{\text{sup}} - P.A_{\text{inf}} (^{\circ}\text{C})$$



Figura 38: Estabilidad de Almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

Realizados los ensayos de penetración y punto de ablandamiento al residuo de estabilidad al almacenamiento, los resultados obtenidos son los siguientes:

ESTABILIDAD AL ALMACENAMIENTO				
Ensayo		Asfalto Modificado		
		1.5%	2.0%	3.0%
Penetración A 77 °F (25°C) [0,1 Mm]	Superior	52.0	48.0	42.0
	Inferior	52.0	50.0	46.0
Punto De Ablandamiento [°C]	Superior	51.8	54.0	58.3
	Inferior	50.8	52.2	55.0

Tabla 35: Resultados del Ensayo de Estabilidad al Almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

Realizando un análisis y comparación técnica sobre los resultados del ensayo de almacenamiento tenemos: que las propiedades se mantienen para los porcentajes 1.5% y 2.0% de este último no varía mucho, en cambio del 3.0% se observa que empieza a rigidizarse y tiende suspenderse el material modificante (parachoques proveniente de vehículos) esto se ve reflejado en las gráficas siguientes:

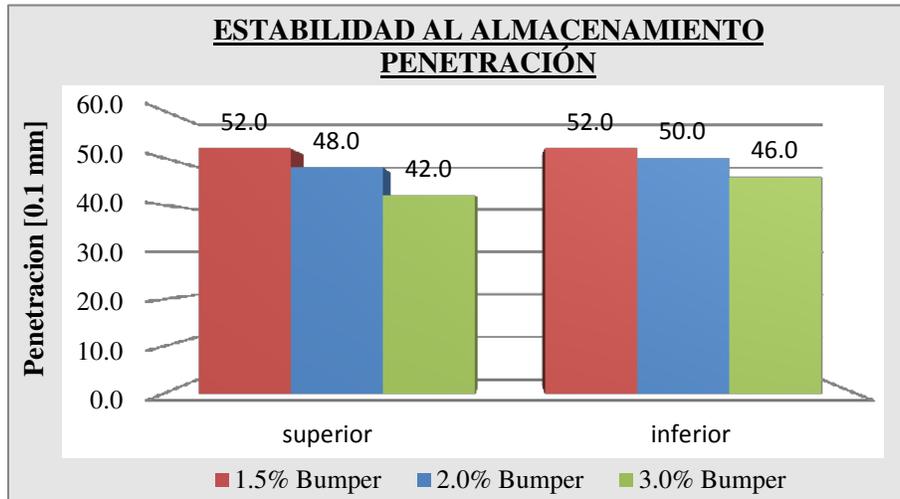


Gráfico 9: Ensayo de Penetración (Estabilidad al Almacenamiento)

Fuente: Elaboración propia

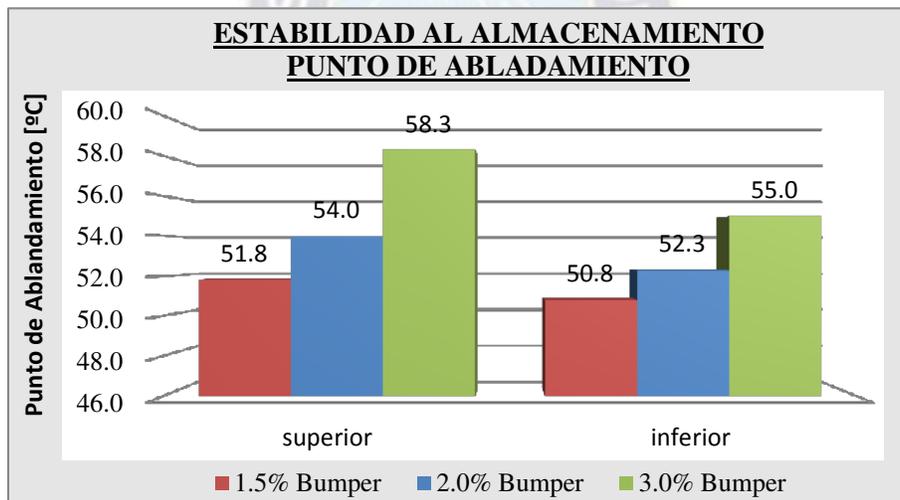


Gráfico 10: Punto de Ablandamiento (Estabilidad al Almacenamiento)

Fuente: Elaboración propia

5.6 RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL Y MODIFICADOS

Caracterización del cemento asfáltico convencional

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS		Método utilizado	Valores Obtenidos en Laboratorio	Especificación ASTM D-946	Verificación
			Prom.		
Peso Específico [gr/cm ³]		ASTM D -70	1.010	0,94 - 1,04 *	CUMPLE
Penetración a 77 °F (25°C) 100 g 5 s [0,1 mm]		ASTM D -5	72	60 - 70	NO CUMPLE
Punto de Inflamación (Vaso abierto de Cleveland) [°C]		ASTM D-92	243	Min. 232	CUMPLE
Ductilidad de 77 °F (25°C) 5 cm/min. [cm]		ASTM D-113	150	Min. 100	CUMPLE
Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]		ASTM D-36	47.5	43 -53 *	CUMPLE
Solubilidad en tricloroetileno [%]		ASTM D-78	99.60	Min 99,0	CUMPLE
Ensayo sobre la Película Delgada	Perdida por Calentamiento [%]	ASTM D-1754	0.106	Max. 0.8	CUMPLE
	Penetración [%] min. del Original	ASTM D-5	67	Min. 54	CUMPLE
	Punto de Ablandamiento (A y B) [°C]	ASTM D-36	53.75	43 - 53*	NO CUMPLE
Ensayo de la Mancha (30% xileno y 70% heptano)		AASTHO T-102	Negativo	Negativo	CUMPLE
Recuperación elástica (%)		ASTM D-6084	10.8		
Punto de Fragilidad Fraass		IP 80-53	-19.5		
Índice de Penetración			-0.99	-1 a 1 *	CUMPLE
			-0.99	-1,5 - 0,5 **	CUMPLE
Viscosidad Rotacional Brookfield, 135°C (cP)		ASTM D-4402	300	Max. 2000	CUMPLE
Viscosidad Rotacional Brookfield, 155°C (cP)		T72 D88	162		
Viscosidad Rotacional Brookfield, 175°C (cP)		T72 D88	68		

* Valores obtenidos de las Normas Chilenas

** Valores obtenidos de las Normas Argentinas

Tabla 36: Resultados de la Caracterización del Asfalto Convencional

Fuente: Elaboración propia