

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**“Análisis comparativo de las mezclas asfálticas
utilizando el cemento asfáltico convencional y el
cemento asfáltico modificado verificando a la
deformación permanente”**

Tramo de estudio: (km184-km218) de la ruta PY02.

Elaborado por

NATHALIA ARAMMI BENITEZ CÁCERES.

Tutor

Prof. Msc. Ing. Hugo Florentin.

Co-Tutor

Prof. Tec. Vial Rafael Ottaviano.

Coronel Oviedo – Paraguay

PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniera Civil aprobado en representación de la Facultad de Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Prof. Ing.

Acta N°: _____

Fecha: _____

Calificación Obtenida: _____

DEDICATORIA:

AGRADECIMIENTOS:

“Análisis comparativo de las mezclas asfálticas utilizando el cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado verificando a la deformación permanente”

NATHALIA ARAMMI BENITEZ CÁCERES

RESUMEN

En la presente investigación denominada “Análisis comparativo de las mezclas asfálticas utilizando el cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado verificando a la deformación permanente” abarca el análisis del comportamiento mecánico y el desempeño entre dos tipos de mezclas asfálticas, a través de la metodología Marshall y el Wheel Tracking Test, teniendo como referencia la mezcla asfáltica utilizada en el tramo de estudio (km184-km218) de la ruta PY02. En esta tesis se presenta una propuesta de mejora a través de una mezcla asfáltica realizada con cemento asfáltico modificado tipo 1.

Por fines investigativos, los diseños para ambos tipos de mezclas asfálticas, se realizará teniendo en cuenta las mismas consideraciones, manteniendo la misma granulometría y mismos agregados, teniendo como única variable el tipo de cemento asfáltico utilizado.

Posteriormente se efectuará el ensayo de rueda cargada, con el fin de medir el desempeño de cada una de las mezclas asfálticas ante la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento.

Palabras claves:

-Mezclas Asfálticas.

-Cemento Asfáltico convencional

-Cemento Asfáltico modificado

-Deformación permanente.

CONTENIDO

RESUMEN	5
CONTENIDO	6
CAPITULO 1 GENERALIDADES	10
1.1. Introducción	10
1.2. Planteamiento y formulación del problema.	11
1.3. Objetivos	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
1.4. Solución propuesta por el proyecto.	15
1.5. Hipótesis del Proyecto.	16
1.6. Justificación.	17
1.8. Antecedentes del proyecto final de grado.	18
CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO	20
2.1. ASFALTOS.	20
2.1.1. Definición del Asfalto.	20
2.1.2. Asfaltos Naturales	21
2.1.3. Procesos de Refinación.	22
2.1.4. Propiedades Físicas y químicas del Asfalto.	24
2.1.5. ASFALTOS MODIFICADOS.	27
2.2. AGREGADOS PETREOS.	30
2.2.1. Gradación.	32
2.2.2. Clasificación de los agregados de acuerdo a la técnica utilizada para su procesamiento.	33
2.3. MEZCLAS ASFALTICAS.	35
2.3.1. Mezclas asfálticas en caliente (MAC).	36
2.3.1.1. Características de las mezclas asfálticas en caliente.	36
2.3.2. Diseño de mezclas asfálticas.	38
2.3.2.1. Diseño de mezclas por el método Marshall.	38
2.3.2.2. Parámetros Volumétricos.	39
2.3.2.3. Requisitos de diseño de una MAC.	42
2.4. Pavimentos flexibles.	43
2.4.1. Características que debe reunir un pavimento.	44

2.4.2.	Tipos de fallas en pavimentos flexibles.....	45
2.5.	DEFORMACION PERMANENTE O AHUELLAMIENTO.	46
2.5.1.	Ahuellamiento por falla de la carpeta asfáltica.....	49
2.5.2.	Factores que influyen en la deformación permanente.	50
2.5.2.1.	Granulometría de los agregados pétreos.....	50
2.5.2.2.	Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos.	51
2.5.2.3.	Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla.....	51
2.5.2.4.	Tipo de Ligante Asfáltico.....	52
2.5.2.5.	El Tránsito.....	53
2.5.2.6.	La temperatura.....	54
2.5.3.	Evaluación del ahuellamiento en el laboratorio.....	55
CAPITULO 3		58
METODOLOGIA.....		58
CAPITULO 4		61
MARCO EXPERIMENTAL		61
4.2.	Caracterización del agregado.....	61
4.3.	Caracterización del Cemento Asfáltico.	64
4.4.	Diseño de mezcla.	67
4.4.1.	Preparación del agregado y dosificación.	67
4.4.2.	Concentración crítica y volumétrica del Filler.....	70
4.4.3.	Método Marshall.	73
4.4.4.	Wheel Tracking Test.	82
CAPITULO 5		91
RESULTADOS Y ANALISIS.....		91
5.1.	Resultados correspondientes a los cementos asfálticos.	92
5.2.	Resultados del diseño de ambas mezclas por el método Marshall.	93
5.2.1.	Asfalto convencional 50/70.....	93
5.2.2.	Asfalto modificado tipo 1.....	98
5.3.	Análisis comparativo de los resultados.	102
5.3.	Resultados del ensayo de rueda cargada (Wheel tracking Test). 104	
5.3.1.	Mezcla con Asfalto Convencional.	104

5.3.2. Mezcla con Asfalto Modificado.....	106
5.5. Clasificación de tránsito.	108
5.6. Comparativa de resultados del WTT.	109
5.7. Análisis de precios unitarios.	111
5.7.1. Comparativa de costos.....	113
CAPITULO 6	¡Error! Marcador no definido.
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	114
6.1. CONCLUSIONES.....	114
6.2. RECOMENDACIONES.	115
CAPITULO 7.	116
Bibliografía	116
CAPITULO 8.	119
ANEXO.....	119
8.1. Agregados pétreos.	119
8.1.1. Índice de lajas y elongación.	119
8.1.3. Desgaste de los ángeles.	122
8.1.4. Ensayo de adherencia.....	123
8.1.5. Peso específico y absorción.....	124
Tabla 45: Peso específico y absorción.....	124
8.1.5. Peso específico de la cal.....	125
8.1.6. Durabilidad por ataque de sulfatos.....	125
8.1.7. Ensayos de cubicidad.	126
8.1.8. Ensayos de Micro Deval.....	128
8.2. Cemento asfáltico.....	129
8.2.1. Ensayo de película delgada.	129
8.2.2. Ensayo de penetración.....	130
8.2.3. Punto de ablandamiento.....	131
8.2.4. Ductilidad.....	132
8.2.5. Viscosidad Rotacional Brookfield.	133
8.2.6. Torsión Elástica.	134
8.2.7. Punto de inflamación y punto de fulgor.	135
8.2.8. Certificados de asfaltos.	136
8.3. Mezclas Asfálticas.....	138

8.3.1. Método rice.....	138
8.3.1.1. <i>CAP MODIFICADO TIPO 1</i>	138
8.3.1.2. <i>CAP NORMAL 50/70</i>	140
8.3.2. Estabilidad remanente.....	141
8.3.1.1. <i>CAP MODIFICADO TIPO 1</i>	142
8.3.1.2. <i>CAP CONVENCIONAL 50/70</i>	142

CAPITULO 1 GENERALIDADES

1.1. Introducción

El betún asfáltico, destilado del petróleo se utiliza en los Estados Unidos desde 1902 y actualmente es una importante fuente de suministro debido a su pureza y economía en comparación con el betún natural.

Al principio los asfaltos modificados se utilizaban en las emulsiones para impermeabilizantes y luego se empezaron a utilizar en la pavimentación, como riegos en tratamientos superficiales en frío, y posteriormente se empezó a modificar el cemento asfáltico para utilizarse cuando se requería un asfalto de mejor calidad o mayor resistencia que la que ofrecía un cemento asfáltico normal.

El tiempo de poner en condiciones óptimas los pavimentos utilizando concreto asfáltico es regularmente menor, lo que redundará en una disminución de costos y de rápida obtención de beneficios económicos por parte de los usuarios de la misma, por lo que el asfalto representa la manera más efectiva para construir y pavimentar carreteras.

El presente trabajo consiste en investigar si dada las altas temperaturas y el prolongado tiempo en que se mantiene, el reemplazo de asfaltos normales por otros de mejor desempeño podría contrarrestar la formación prematura de roderas (huellas) en la carpeta. Aparte de los ensayos corrientes de diseño por el método Marshall, se efectuarán comparativos con el correspondiente al de ahuellamiento, por el método de rueda cargada (WTT). La comparación entre asfalto normal y asfalto modificado, estará dada por los puntos de ablandamientos, viscosidad y penetración de los resultados de cada uno.

1.2. Planteamiento y formulación del problema.

Según estadísticas internacionales, Paraguay ocupa el último lugar en cuanto a desarrollo de infraestructura vial. Según el informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe, nuestro país ocupa el último lugar de América Latina en términos de “densidad vial total”. [1]

El pavimento asfáltico, es uno de los más utilizados en las construcciones viales, el mismo está compuesto de una base y sub-base que usualmente son de materiales granulares pétreos, y una carpeta asfáltica que permite la distribución de cargas a la subrasante.

El asfalto es utilizado como aglomerante para la construcción de este tipo de pavimentos, dicho material posee unas características visco-elásticas por lo que la conducta del mismo está en función tanto de las condiciones de carga como la temperatura. A temperaturas altas el asfalto puede comportarse como un líquido viscoso en otras palabras material plástico, ya que una vez que comienzan a fluir pierden su forma y jamás la recuperan lo que puede ocasionar fallas en la carpeta asfáltica como el ahuellamiento que se manifiesta superficialmente debido a las altas temperaturas en tiempo prolongado, cargas pesadas, y circulación a bajas velocidades, evidenciada en correspondencia con la huella de circulación vehicular.

Ante esta realidad existe la necesidad de mejorar la tecnología de los pavimentos asfálticos en el País, para que alcancen la vida útil para la que fueron diseñados, considerando que el cemento asfáltico, puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante una de las fallas más preocupantes en el deterioro de los pavimentos, que es la

deformación permanente.

La Mencionada falla fue apareciendo en forma notable y en corto plazo luego de la construcción y mantenimiento de una de las carreteras más importantes de nuestro país, la denominada Ruta PY02, la misma cuenta con un alto volumen de tráfico diario de vehículos livianos y pesados ya que atraviesa una zona de alta Productividad Agrícola e Industrial, afectando de esta manera el nivel de servicio del pavimento como también reduciendo la vida útil del mismo y ocasionando un elevado costo de mantenimiento.

Ilustración 1: Deformación visualizada in situ.



Fuente: Propia.

Ilustración 2: Medición del ahuellamiento in situ.



Fuente: Propia.

Se realizaron las mediciones correspondientes a las deformaciones visualizadas en la carpeta desde el km 189+700 al km 200+700, correspondiente a una de las calzadas del pavimento (Calzada Norte). Cabe resaltar que dichas mediciones fueron realizadas durante mi periodo de pasantía, realizada en dicha obra.

Posterior a la realización de las mediciones, se obtuvieron los siguientes resultados, indicados en la **Tabla 2**. Verificando de esta manera, que existe una deformación considerable en el pavimento asfáltico, donde superan los 10 mm admisibles de acuerdo al criterio de evaluación.

Tabla 1: Resultados de la medición del ahuellamiento.

Relevamiento de defectos	Ahuellamiento (mm) (enero)		Ahuellamiento (mm) (marzo)		
	Calzada N		Calzada N		
	S	N	S	N	
Km					
189+760	4	13	0	0	60
189+820	10	12	3	2	
189+880	13	14	0	0	40
189+920	10	12	4	10	
190+000	16	18	5	11	180
190+180	12	10	6	7	
191+800	10	9	10	12	680
192+480	7	12	13	14	
193+140	14	15	16	16	620
193+760	10	13	10	12	
194+460	12	15	5	7	40
194+500	11	12	6	8	
195+420	12	12	4	6	80
195+500	12	11	16	16	
195+660	10	14	0	0	520
196+180	16	14	7	9	
196+380	11	13	12	12	1060
197+440	20	10	11	13	
197+520	18	15	7	9	320
197+840	10	10	11	12	
198+140	10	12	13	15	860
199+000	11	10	11	11	
199+140	7	10	12	10	140
199+280	20	11	0	0	
TOTAL					4.600 m

Fuente: Propia.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas utilizando el cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado ante la deformación permanente (ahuellamiento).

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar las propiedades mecánicas y volumétricas de la mezcla asfáltica utilizando cemento asfáltico convencional y el cemento asfáltico modificado.
- Conocer las propiedades ante la resistencia a la deformación permanente (ahuellamiento) de las alternativas de mezclas asfálticas estudiadas mediante el ensayo de rueda cargada.
- Realizar un análisis de viabilidad técnica y económica entre ambas alternativas de cemento asfáltico.
- Proponer la mezcla asfáltica que tenga un mejor comportamiento ante la deformación permanente (ahuellamiento).

1.4. Solución propuesta por el proyecto.

En esta investigación se tendrá en cuenta principalmente la formación de ahuellamientos o deformaciones permanentes debido a la falla de la carpeta asfáltica, manteniendo la granulometría y características de los agregados, modificando la mezcla asfáltica utilizada en el tramo de estudio, solo en el tipo de asfalto a utilizar, para posteriormente compararlos mediante varios ensayos y obtener el comportamiento de las mismas ante la verificación al ahuellamiento.

Mediante este proyecto lo que buscamos es verificar y comparar los beneficios técnicos y económicos que podría aportar el uso de un cemento asfáltico modificado con polímero con relación al cemento asfáltico normal utilizado en el país, ante la aparición de huellas en la carpeta, analizando su desempeño ante las deformaciones por altas temperaturas y las cargas de tránsito que se manifiestan actualmente.

Una vez concluida la investigación, para las obras viales, que cuenten con características similares en la zona, se podrá recomendar la utilización del asfalto que presente un mejor desempeño y resistencia ante la aparición de roderas, y así poder evitar los costos de un mantenimiento a corto plazo de la carpeta.

1.5. Hipótesis del Proyecto.

La utilización de un cemento asfáltico modificado nos ofrecerá una mezcla asfáltica capaz de resistir las cargas de tránsito y las altas temperaturas que se manifiestan actualmente, en comparación al cemento asfáltico convencional 50/70 utilizado en el país.

Obteniendo de esta manera un mejor comportamiento a la resistencia al ahuellamiento o deformación permanente.

1.6. Justificación.

Actualmente, el pavimento asfáltico es uno de los tipos de pavimentación más utilizados en el país en obras y proyectos relacionados con la infraestructura vial. Paraguay ha realizado grandes esfuerzos para mejorar su red vial, pero aún existen desafíos en esta área. Con la implementación de trabajos y proyectos relacionados a la pavimentación y el mantenimiento de las carreteras, se han incrementado las inversiones en la construcción de ingeniería vial. Sin embargo, los indicadores internacionales de la superficie de las carreteras todavía muestran que estos esfuerzos no son suficientes.

Es necesario estudiar y mejorar la preparación, en cuanto al uso y durabilidad de los pavimentos, obteniendo mezclas resistentes a las deformaciones permanentes y fisuras mediante la utilización de asfaltos con características mejoradas que presentaran mayores ventajas que los asfaltos convencionales de uso intensivo en nuestro medio, en las carreteras y caminos a nivel nacional además que por la gran demanda de tránsito vehicular, las superficies se deterioran con mucha facilidad (más aun en las estructuras que no cuentan con una carpeta de transición o base negra). Conforme a lo señalado precedentemente, la propuesta encuentra suficiente justificación en lo siguiente:

Se obtendrá un pavimento más duradero que ofrezca un mejor comportamiento ante las cargas y las altas temperaturas.

Mejorará la funcionalidad del pavimento logrando una mayor seguridad en el tránsito vial.

En el aspecto económico dará beneficios en cuanto a la disminución de costos de inversión pública en concepto de mantenimiento y reparación del pavimento considerando que propiciará una vida útil

a mayor plazo de la carpeta asfáltica.

En el ámbito académico esta investigación servirá de referencia para Investigaciones posteriores, además de que la solución más óptima podrá aplicarse a otras carreteras que presenten características similares a las del objeto en estudio.

1.8. Antecedentes del proyecto final de grado.

La Ing. Nadia Angelica Centurión, realizó una investigación respecto a la “Influencia de la temperatura del Hamburg Wheel Tracking Test en el desempeño de las mezclas asfálticas en caliente” en el año 2021.

En donde los resultados expuestos demuestran que existe importante variación en los valores de deformaciones obtenidas. Es decir, a mayores temperaturas los valores de deformaciones también aumentan.

El Estudio del ahuellamiento en la Carretera IIRSA NORTE, Tramo 6, Sector óvalo Cáceres presentado como PFG presentado por Giomar Erick Romero Rojas en el año 2012.

Su objetivo principal fue investigar las razones que podrían explicar la formación paulatina de huellas en la capa asfáltica, en el pavimento del tramo 6 de la carretera IIRSA NORTE, especialmente en la zona del Ovalo Cáceres.

Concluyeron que el tráfico real (número de ejes equivalentes, EAL's) es mayor al tráfico de diseño. Se obtuvo mediante la evaluación de los sobrepesos de los ejes equivalentes de los distintos tipos de camiones y la presión de inflado de las cubiertas. Por lo que, uno de los factores que incrementa el ahuellamiento es el exceso de carga vehicular, principalmente de los pesados.

La investigación presentada por los autores: *Gerardo Luis Villafana Huamán, Raúl Mauricio Ramírez Villanueva* titulada “ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA MODIFICADA CON POLÍMEROS SBS BETUTEC IC Y UNA MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL 60/70” presentada en el año 2019.

El objetivo general fue determinar cuál de las dos mezclas presentaba mejores propiedades mecánicas, si se trataba de una mezcla asfáltica modificada con polímero SBS Betutec IC o una mezcla asfáltica convencional 60/70.

Concluyeron que el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros nos daría mejores propiedades mecánicas en comparación con las mezclas convencionales 60/70, ya que mejora el desempeño del pavimento y por ende alarga su vida útil. Debido a los resultados obtenidos en los diseños tanto de estabilidad como flujo, la mezcla asfáltica modificada con polímeros SBS Betutec IC demostró tener un mejor comportamiento mecánico que la mezcla asfáltica convencional 60/70, con respecto a los resultados de la rueda de Hamburgo nos demuestra que la mezcla modificada con polímeros SBS Betutec IC presenta un desempeño muy superior respecto a la mezcla convencional 60/70

CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. ASFALTOS.

2.1.1. Definición del Asfalto.

Definición ASTM de betún: Un aglomerante sólido o semisólido cuyo color varía de negro a marrón oscuro y que se licua gradualmente cuando se calienta, cuyo componente principal es betún sólido o semisólido natural o petróleo obtenido por destilación; o combinados entre sí o con aceite o productos derivados de estas combinaciones.[3]

2.1.1.1. Asfaltos derivados del petróleo.

Ilustración 3: Componentes obtenidos en la destilación de un crudo típico productor de asfalto.

Gasoline
Kerosene
Diesel Oil
Lubrication Oils
Asphalt
Cement

Components Obtained in the Distillation of a Typical Asphalt Producing Crude Oil.

Fuente: Referencia [5]

En la actualidad la principal fuente de asfalto es el obtenido de la refinación del petróleo. Las porciones más pesadas o más viscosas de ciertos petróleos crudos son asfaltos. El desglose de dicho crudo se muestra esquemáticamente en la siguiente ilustración. Debe tenerse en cuenta que esto es simplemente un esquema de representación de los constituyentes de un petróleo crudo y que las proporciones variarán, dependiendo del crudo en particular.

Cuando el petróleo se extrae de un pozo, se somete a un proceso de destilación en el que las fracciones más ligeras, como la nafta y el queroseno se separan de la matriz bituminosa mediante

evaporación, fraccionamiento y condensación. Por tanto, el betún asfáltico se obtiene como residuo del proceso anterior.

Este tipo de asfaltos, poseen las mismas características de durabilidad que un asfalto natural, pero con la diferencia de que éste puede ser refinado hasta una condición uniforme, libre de materias orgánicas y minerales extraños [6].

2.1.2. Asfaltos Naturales

Los asfaltos naturales pueden existir tanto en forma relativamente pura en la naturaleza o en depósitos de roca impregnada. La siguiente tabla contiene una lista de una serie de diferentes asfaltos naturales junto con ciertas propiedades físicas que dan una indicación de las características de estos materiales. De estos asfaltos naturales, dos todavía tienen importancia comercial, (1) asfalto del lago Trinidad y (2) Gilsonita.

Ilustración 4: Tabla de Asfaltos Naturales.

TABLE of NATURAL ASPHALTS

Name	Source	Approximate Softening Point (R&B) ^o F	Approximate Penetration at 77 ^o F	% Mineral Matter
Bermudez	Venezuela	145-160	20-30	1-7
Trinidad*	Trinidad Island	205	2-4	39
Gilsonite*	Utah, Colorado	250-350	0-3	trace
Manjak (Glance Pitch)	Numerous Areas	275-400	0	0-30
Grahamite	West Virginia & Utah	370-600	0	trace - 50
Elaterite	Europe & Asia	Infusible	0	2-7
Wurtzilite	Utah	Infusible	0	2
Albertite	Numerous Areas in Canada	Infusible	0	trace - 15
Impsonite	Numerous Areas	Infusible	0	trace - 15

*Natural asphalts that have commercial significance.

Fuente: Referencia [5].

(1) **El asfalto Trinidad** es un asfalto obtenido del lago de la isla de Trinidad y se ha utilizado durante muchos años en construcción de carreteras. En general, el material se ha utilizado con éxito y es, por lo tanto, referido como un producto de calidad. Este

material existe en una forma específica en la naturaleza y no está sujeta a la variedad de procesos a los que se someten los asfaltos fabricados.

- (2) **Gilsonita** es un ejemplo de prácticamente un asfalto puramente natural, siendo más del 90 por ciento soluble en disulfuro de carbono. Este material es muy duro, teniendo una penetración cero. Si bien el material no se ha utilizado en la construcción de carreteras, se utiliza en pinturas asfálticas, cajas de baterías y baldosas asfálticas.

Además de estas formas, los asfaltos también se encuentran de forma natural en depósitos de rocas. [6]

2.1.3. Procesos de Refinación.

2.1.3.1. Refinación del petróleo.

El petróleo crudo se refina por medio de la destilación. Este es un proceso donde se separan diferentes fracciones hacia el exterior del crudo por medio del aumento gradual de la temperatura.

Las fracciones livianas se separan por destilación simple, los destilados más pesados, usualmente llamados gasóleos, pueden ser separados mediante una combinación de calor y vacío.

Una vez que se hayan combinado los crudos de petróleo, los asfaltos pueden producirse mediante la destilación por vacío y extracción con solventes.

La destilación al vacío consiste en separar el betún del petróleo crudo mediante la utilización de calor y vacío.

La extracción con solventes elimina más gasóleo del crudo, dejando un residuo de betún. [7]

Ilustración 5: Productos y temperaturas típicas de destilación.

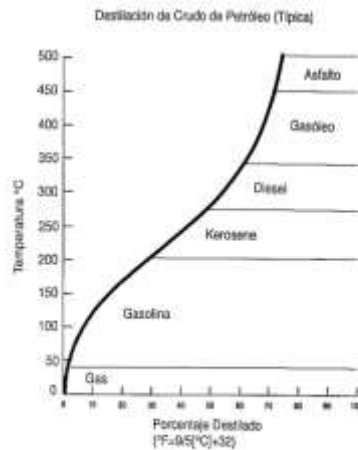


FIGURA 2.1 - Productos y Temperaturas Típicas de Destilación.

Fuente: Referencia [7].

2.1.3.2. Refinación del Asfalto.

Diferentes usos requieren diferentes tipos de asfaltos. Esto generalmente se logra mezclando diferentes tipos de petróleo crudo antes del procesamiento. La capacidad de mezcla permite a las refinerías mezclar petróleo crudo que contiene betún con propiedades variables para dar al producto final las propiedades deseadas por el usuario

Existen dos procesos por los cuales puede ser producido un asfalto después que se han combinado los crudos del petróleo, los cuales se mencionaron en el ítem anterior [7]

terminado.

c) Susceptibilidad al endurecimiento y al envejecimiento: El endurecimiento del betún asfáltico es causado por la combinación con oxígeno (oxidación) o evaporación (gas sólido). La peor oxidación y endurecimiento ocurre durante el mezclado debido a que el betún está a alta temperatura y en estado de película delgada.

d) Susceptibilidad a la temperatura: Esta es una de las propiedades más importantes del asfalto. Esta propiedad, varía entre asfaltos de diferente origen, sin importar que tengan el mismo grado de consistencia. [7]

2.1.4.2. Propiedades químicas del asfalto.

El asfalto tiene propiedades químicas únicas que lo convierten en un material versátil para la construcción de carreteras.

Básicamente el asfalto está compuesto por varios hidrocarburos (combinaciones moleculares de hidrogeno y carbono) y algunas trazas de azufre, oxigeno, nitrógeno y otros elementos. El asfalto cuando es disuelto en un solvente como el heptano puede separarse en dos partes principales: Asfáltenos y Máltenos.

Los asfáltenos no se disuelven en el heptano. Los asfáltenos una vez separados de los máltenos son usualmente de color negro o pardo oscuro y se parecen al polvo grueso de grafito.

Los asfáltenos le dan al asfalto su color y dureza.

El malteno disuelto en heptano. Es un líquido viscoso formado por resinas y aceites. Las resinas suelen ser líquidos pesados de color marrón oscuro, mientras que los aceites son más ligeros. Las resinas proporcionan las cualidades adhesivas en el asfalto, mientras que los aceites actúan como un medio de transporte para los asfáltenos y las resinas. [7]

2.1.4.3. Reología del asfalto

La reología se define como la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales bajo la aplicación de una carga.

2.1.4.4. Propiedades reológicas de los materiales asfálticos.

La reología mide la deformación de objetos que no son ni sólidos ni líquidos, es decir intermedio entre sólidos elásticos y líquidos viscosos.

La reología estudia las siguientes propiedades:

- La teoría de la elasticidad y resistencia de los materiales.
- La plasticidad.
- La viscosidad.
- La hidráulica.

2.1.4.5. Características reológicas del asfalto.

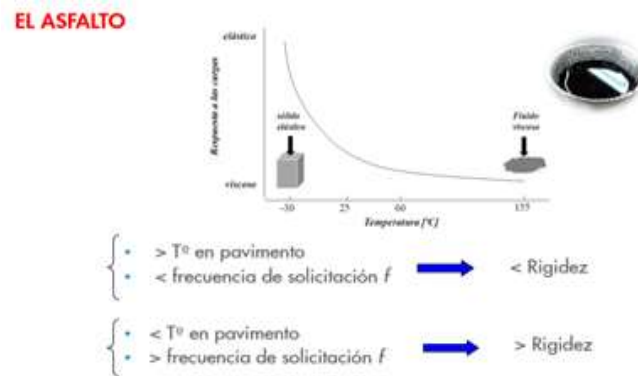
La reología es una de las propiedades más importantes de los productos bituminosos. Se refiere a los cambios en las propiedades de flujo durante la aplicación de la carga, incluida una propiedad muy importante: la viscosidad.

La viscosidad del asfalto varía con la temperatura en mayor o menor grado (susceptibilidad térmica) y su estudio es muy importante y de interés práctico, porque en todas las aplicaciones del asfalto se debe modificar su viscosidad mediante el calentamiento.

A altas temperaturas, el betún se considera un líquido viscoso, mientras que a bajas temperaturas de funcionamiento se considera un sólido elástico. Para comprender las propiedades de fluidez del asfalto a diferentes temperaturas, actualmente se

utilizan combinaciones de letras y curvas relacionadas con las principales propiedades del asfalto. [8]

Ilustración 7: Comportamiento del Asfalto ante la temperatura y las cargas.



Fuente: Presentación - Seminario APC.

2.1.5. ASFALTOS MODIFICADOS.

2.1.5.1. Reseña histórica del asfalto modificado

El asfalto modificado se utilizó originalmente en emulsión para impregnación, posteriormente se empezó a utilizar para tratar la superficie fría de los pavimentos asfálticos, y posteriormente se empezó a modificar el cemento asfáltico común para que pueda ser utilizado cuando se necesite un asfalto de mejor calidad o mayor resistencia. [4]

2.1.5.2. Definición de Polímero.

Se define un polímero como un compuesto de alto peso molecular formado por una combinación de moléculas llamadas monómeros (compuestos de moléculas simples) que se combinan para formar moléculas más grandes en varios arreglos. En síntesis, el betún modificado con polímeros es un betún al que se le han añadido algún tipo de polímeros para mejorar sus características mecánicas. [9]

2.1.5.3. Cemento Asfáltico Modificado.

Al incorporar polímeros u otros productos al asfalto, se mejoran las propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas de la mezcla asfáltica. De esta manera, busca mejorar el desempeño de los compuestos convencionales bajo diferentes cargas y condiciones ambientales.

Generalmente, las propiedades que deben mejorarse son la rigidez y la resistencia bajo cargas monotónicas, arrugas, fatiga y envejecimiento, así como una menor sensibilidad al calor y daño por humedad. Esta técnica también se usa a menudo en los casos en que el pavimento debe tener una vida útil más larga que el pavimento convencional o en aplicaciones especiales donde se permite o reduce el espesor de una capa de asfalto más delgada [10]

2.1.5.4. Principales modificadores utilizados en el Asfalto.

Hoy en día se obtienen polímeros sintéticos de formulación especial que resultan muy competitivos. Los asfaltos modificados con estos polímeros han sido probados en pavimentos en varios países.

Los principales modificadores utilizados en los materiales asfálticos son:

- POLÍMERO TIPO I: Mejora el desempeño de las mezclas asfálticas a temperaturas variables. Se utiliza en mezclas asfálticas para pavimentos delgados y estructurales con tránsito pesado, tanto en climas fríos como cálidos y en la preparación de emulsiones para el tratamiento de superficies.
- POLÍMERO TIPO II: Es un modificador de asfaltos que mejora el comportamiento de mezclas asfálticas a bajas temperaturas. Es fabricado con base en polímeros elastómeros lineales,

mediante una configuración de caucho de Estireno, Butadieno-Látex o Neopreno-Látex. Se utiliza en todo tipo de mezclas asfálticas para pavimentos en los que se requiera mejorar su comportamiento de servicio, en climas fríos y templados, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- POLÍMERO TIPO III: Es un modificador de asfaltos que mejora la resistencia a las roderas de las mezclas asfálticas, disminuye la susceptibilidad del cemento asfáltico a la temperatura y mejora su comportamiento a altas temperaturas. Es fabricado con base en un polímero de tipo elastómero, mediante configuraciones como Etileno – Vinil - Acetato (EVA) o polietileno de alta o baja densidad, entre otras. Se utiliza en climas calientes, en mezclas asfálticas para carpetas estructurales de pavimentos con elevados índices de tránsito, así como para elaborar emulsiones que se utilicen en tratamientos superficiales.

- HULE MOLIDO DE NEUMATICOS: Es un modificador de asfaltos que mejora la flexibilidad y resistencia a la tensión de las mezclas asfálticas, reduciendo la aparición de grietas por fatiga o por cambios de temperatura. Es fabricado con base en el producto de la molienda de neumáticos. Se utiliza en pavimentos con capa de rodaduras delgadas de granulometría abierta y en tratamientos superficiales. [4]

2.1.5.5. Ventajas del uso del cemento Asfáltico modificado respecto al cemento asfáltico convencional.

Los asfaltos convencionales poseen propiedades beneficiosas mecánicamente, pudiendo utilizarse bajo distintas condiciones de clima y de tránsito. No obstante, el aumento del tráfico, las cargas y la necesidad de optimizar la inversión, hacen que las propiedades del asfalto convencional sean insuficientes en

algunos casos. Por ejemplo, con los asfaltos convencionales, aun con los grados más duros, no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito canalizado (ahuellamiento), especialmente cuando se deben afrontar condiciones de alta temperatura. Además, con la simple adopción de asfaltos más duros se corre el riesgo de fisuraciones por efectos térmicos cuando las temperaturas son muy bajas.

Con ciertas mezclas abiertas, la alternativa generada por razones de confort y seguridad, con los ligantes convencionales no se alcanzaría una resistencia mecánica suficiente a causa de una insuficiente cohesión y adhesividad, lo que unido al bajo contenido de ligante de estas mezclas podría redundar en una disminución en su durabilidad. Del mismo modo, las nuevas capas superficiales delgadas serían menos durables cuando se vean sometidas a altas intensidades de tránsito.

Ante este problema, una solución obvia es mejorar algunas propiedades del asfalto convencional para lograr un mejor desempeño del pavimento. Esto crea un nuevo betón comúnmente conocido como "Cemento Asfáltico modificado".[11]

2.2. AGREGADOS PETREOS.

Los agregados utilizados en la construcción de carreteras se obtienen en gran parte de los suministros locales de roca natural. Las rocas naturales aparecen como afloramientos en la superficie o cerca de ella o como depósitos de grava, por lo general a lo largo de antiguos lechos de arroyos. Los geólogos clasifican las rocas naturales en tres grupos según su origen ígneo, sedimentario y metamórfico. Otros tipos de agregados que a veces se usan para MAC son agregados livianos, producidos al calentar arcilla a temperaturas muy altas, y escoria, normalmente

producida en el alto horno durante la producción de acero. Estos dos agregados artificiales han proporcionado una buena resistencia al deslizamiento cuando se usan en MAC.

Rocas ígneas: son principalmente cristalinas y se forman por el enfriamiento del magma de roca fundida a medida que se mueve hacia o sobre la superficie de la tierra. Las rocas ígneas se clasifican según el tamaño de los granos de cristal y la composición en ácidas o básicas. Los granos de cristal se clasifican como gruesos si son mayores de 2 mm y finos cuando son menores de 0,2 mm.

La clasificación de las rocas ígneas según su composición se muestra a continuación:

Ilustración 8: Clasificación de las rocas ígneas.

	<u>Acidic</u>	<u>Intermediate</u>	<u>Basic</u>
Silica, %	> 66	55-66	< 55
Specific gravity	< 2.75	—	> 2.75
Color	Light	—	Dark
Presence of free quartz	Yes	—	No

Fuente: Referencia [5].

Rocas sedimentarias: se forman principalmente por la deposición de residuos insolubles de la desintegración de rocas existentes o por la deposición de restos inorgánicos de animales marinos. La clasificación se basa en el mineral predominante presente como calcáreo (piedras calizas, cretas, etc.), silíceo (pedregoso, arenisca, etc.) o arcilloso (lutita, etc.).

Rocas metamórficas: son rocas ígneas o sedimentarias que han sido sometidas a calor y/o presión suficiente para cambiar su estructura mineral y ser diferente de la roca original. Las rocas metamórficas son generalmente de naturaleza cristalina con

tamaños de grano de fino a grueso.

Las gravas: se forma a partir de la descomposición de cualquier roca natural. Las partículas de grava se encuentran en vías fluviales existentes o antiguas, y las partículas suelen ser suaves y típicamente redondeadas o subredondeadas por el desgaste a medida que el material se mueve a lo largo de la vía fluvial por la acción del agua. Por lo general, se requiere triturar la grava antes de usarla en MAC. [5]

2.2.1. Gradación.

En un ensayo de granulometría por cribado o tamizado, las partículas con diámetro entre 2mm y 6,4 cm son reconocidas como gravas, aquellas con diámetros entre 0,075 y 2 mm son reconocidas como arenas (gruesas y finas) y las que son de diámetro inferior a 0,075 mm son reconocidas como tamaño de arcilla. Estas últimas pueden adquirir la denominación de Filler o llenante mineral si no experimentan plasticidad en contacto con el agua (IP=0).

Dentro de la mezcla asfáltica, los agregados conforman entre el 88% y 96% de la masa total y más del 75% del volumen de la mezcla. Por otro lado, dentro de la carpeta asfáltica los agregados pétreos soportan las cargas del tránsito vehicular y se transmite en menor proporción a las capas por debajo de la carpeta de rodadura.

Los agregados deben poseer una granulometría adecuada al huso y deben cumplir con los requerimientos mínimos de calidad. [12]

Una mezcla para pavimentación se clasifica de acuerdo a su tamaño máximo o tamaño máximo nominal. Uno de los libros de mezclas asfálticas en caliente [10], especifica que para la mayoría

de las mezclas asfálticas en caliente se requieren gradaciones densas (mezclas convencionales) para agregados.

En la siguiente figura se exponen las especificaciones sugeridas por la norma utilizada:

Ilustración 9: Gradaciones propuestas para mezclas densas.

Tamiz	Tamaño máximo nominal del agregado				
	(1 1/2")	(1")	(3/4")	(1/2")	(3/8")
Porcentaje acumulado que pasa (por peso)					
50 mm (2")	100				
37,5 mm (1 1/2")	90-100	100			
25,0 mm (1")	90-100		100		
19,0 mm (3/4")	56-80	90-100		100	
12,5 mm (1/2")	56-80		90-100	100	
9,5 mm (3/8")	56-80			90-100	90-100
4,75 mm (Nº 4)	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2,36 mm (Nº 8)*	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0,30 mm (Nº 50)	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0,15 mm (Nº 100)					
0,075 mm (Nº 200)**	0-5	1-7	2-8	2-10	2-10
Cemento asfáltico, % en peso de la mezcla total***	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12
	4 y 67	5 y 7	67 o 68	7	
	o	o	o	o	
	4 y 68	57	6 y 8	78	8

Fuente: Norma ASTM D-3515

2.2.2. Clasificación de los agregados de acuerdo a la técnica utilizada para su procesamiento.

Dependiendo de los métodos utilizados para su procesamiento, los áridos se pueden clasificar de la siguiente manera:

a) Agregados Naturales. Este tipo de agregado pasa por un proceso de tamizado en su gradación, para luego, según sea requerido se podrá considerar tamaño y forma de acuerdo a los parámetros que se establezcan.

b) Agregados de Trituración. Son agregados que pasan por un proceso de clasificación, mediante una maquina es triturada la roca procedente de Cantera, obteniendo diferentes gradaciones según para lo que serán utilizadas (arena chancada, piedra chancada), son clasificados según la necesidad de la obra. Antes de pasar para ser triturados pasan por un control de calidad para

ver sus cualidades físicas.

c) Agregados Artificiales: Existen diferentes procesos para obtener este material, algunos de estos productos provienen de la demolición, otros son materiales reciclados, el concepto final es poder reutilizarlo cumpliendo con los requisitos técnicos. [13]

Clasificación de los agregados según su tamaño.

a) Agregado Grueso.

Se define como agregado grueso, la parte del agregado total retenida en el tamiz 4,75 mm. Los requisitos a cumplir por los agregados gruesos dependen del índice de tránsito y de la ubicación de la capa asfáltica. [14]

b) Agregado Fino.

Se define como agregado fino la parte del agregado total pasante por el tamiz IRAM 4,75 mm

c) Relleno Mineral (Filler).

Se define como Relleno Mineral (Filler) a la fracción pasante por el tamiz N°200 de malla 0,075mm.

El Filler puede provenir de los agregados pétreos o bien puede ser Filler de aporte; definiendo como Filler de Aporte a aquellos que no provienen de la recuperación de los finos constituyentes de los agregados pétreos (durante el proceso de elaboración de la mezcla asfáltica).

Para estos tipos de mezclas asfálticas, el Filler de Aporte debe ser cal hidratada.

El Filler de Aporte debe estar constituido por alguno de los siguientes materiales:

– Calcáreo molido (polvo calizo)

- Cal hidratada
- Cal hidráulica hidratada.

El Filler de Aporte debe ser homogéneo, seco y libre de grumos provenientes de las partículas. [14]

2.3. MEZCLAS ASFALTICAS.

Según [15], La mezcla asfáltica se puede definir como una combinación de agregados minerales aglomerados con un aglutinante bituminoso y mezclados de tal manera que cubren los agregados de piedra con una película bituminosa uniforme.

Las proporciones relativas de estos materiales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el comportamiento funcional de la misma como pavimento.

Las principales propiedades que se desean en las mezclas son:

- Resistencia bajo carga monotónica a tracción (estabilidad).
- Resistencia a las deformaciones permanentes.
- Resistencia a fatiga.
- Resistencia al deslizamiento.
- Impermeabilidad.
- Resistencia al envejecimiento.
- Durabilidad.
- Resistencia a las condiciones ambientales.
- Trabajabilidad.
- Economía.

Las diferentes mezclas asfálticas se constituyen por agregados pétreos con diferentes tamaños de partículas y requisitos mínimos de calidad. También difieren en su función en la estructura del pavimento y el tipo de asfalto o ligante utilizado. [12]

2.3.1. Mezclas asfálticas en caliente (MAC).

Las MAC se pueden hacer a partir de diferentes combinaciones de agregados, cada uno con propiedades específicas para propósitos específicos de diseño y construcción. Las mezclas asfálticas en caliente pueden ser producidas por un amplio rango de combinaciones de agregados, cada uno con sus características particulares adecuadas al diseño específico y a sus usos en la construcción. [16]

La mezcla asfáltica en caliente (MAC) está diseñada para mantener las siguientes propiedades durante su vida útil:

- Durable, flexible y trabajable.
- Resistente a la deformación plástica, a la fatiga, al fracturamiento por baja temperatura, al daño por humedad y al deslizamiento.

2.3.1.1. Características de las mezclas asfálticas en caliente.

El comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente está completamente relacionado con las propiedades operativas de la mezcla, que a su vez están directamente relacionadas con las propiedades de los materiales que la componen; elegir el tipo, la cantidad de agregado y asfalto es muy importante.

Las características que debe tener una mezcla asfáltica en caliente al entrar en servicio son las siguientes:

-
- **Estabilidad:** es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir la deformación y el desplazamiento originados por la acción de las cargas del tránsito. La estabilidad es proporcionada por la fricción interna y la cohesión; la fricción interna depende de la textura superficial, forma de la partícula, granulometría del agregado, densidad de la mezcla, y la cantidad y tipo de asfalto; la cohesión depende del contenido de asfalto.
 - **Trabajabilidad:** es la capacidad de la mezcla de ser colocada y compactada sin requerir esfuerzos muy grandes, esta característica depende de una característica o la combinación de algunas propiedades del agregado pétreo, granulometría y contenido y viscosidad del asfalto utilizado.
 - **Durabilidad:** es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir los efectos dañinos del agua, temperatura, tránsito y aire que pueden provocar el envejecimiento del asfalto, la desintegración del agregado y desprendimiento de la película de asfalto del agregado; esta característica de la mezcla asfáltica está directamente relacionada con el espesor de la película de asfalto y con los vacíos de aire.
 - **Flexibilidad:** es la capacidad de la mezcla asfáltica de amoldarse sin sufrir agrietamiento o fisuración, ocasionados por los asentamientos de las capas inferiores del pavimento incluyendo la subrasante.
 - **Resistencia a la fatiga:** es la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir la repetición de cargas del tránsito; el agrietamiento por fatiga está relacionado con el contenido y rigidez del asfalto; si la mezcla trabaja con un contenido muy alto, la mezcla tenderá a deformarse elásticamente, la resistencia a la fatiga depende en gran medida de la capacidad estructural del pavimento.
 - **Resistencia al fisuramiento por baja temperatura:** es la

capacidad de la mezcla asfáltica a no agrietarse a bajas temperaturas; depende de la rigidez del asfalto a bajas temperaturas.

- Resistencia a la humedad: es la capacidad de la mezcla de resistir el paso de agua y aire por los vacíos dentro de la mezcla asfáltica; se relaciona con las propiedades químicas del agregado pétreo y de los vacíos de aire en la mezcla compactada.
- Resistencia al deslizamiento: es la capacidad de la mezcla asfáltica a no perder la adherencia entre las llantas y la superficie de rodadura en épocas cuando está expuesta a la humedad; las características de los agregados y el contenido de asfalto proporcionan la resistencia al deslizamiento. [17]

2.3.2. Diseño de mezclas asfálticas.

El diseño de MAC ha evolucionado a lo largo de los años. Estos cambios se reflejan tanto en la producción de mezclas asfálticas como en la evaluación de su desempeño.[18]

Hay dos métodos de diseño más comunes que se pueden usar para determinar la proporción correcta de asfalto y agregado. Son el método Marshall y el método SUPERPAVE utilizado en Estados Unidos porque se considera un método de diseño basado en pruebas más realistas y científicas que un método empírico como el método Marshall; en países como el nuestro, en la mayoría de los casos se utiliza el método Marshall. [19]

2.3.2.1. Diseño de mezclas por el método Marshall.

El propósito del método Marshall es determinar el contenido óptimo de betún para una combinación específica de agregados. El método también proporciona información sobre las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y determina la densidad y la relación de vacíos óptima que se observará durante

la preparación de la mezcla. El método Marshall original solo era adecuado para rellenos de mezcla asfáltica en caliente con un tamaño máximo de 25 mm (1 pulgada) o menos. Este método se puede utilizar en el diseño de laboratorio y el control de campo de la mezcla asfáltica en caliente.[19]

Este procedimiento se aplica a las mezclas de cemento asfáltico en caliente que contengan áridos de tamaño máximo absoluto igual o inferior a 25 mm. Se puede utilizar para el diseño de laboratorio y el control de campo, y describe métodos para determinar mezclas asfálticas óptimas. [14]

2.3.2.2. Parámetros Volumétricos.

Un factor a considerar cuando se estudia el comportamiento de las mezclas asfálticas es la fracción de volumen asfáltico y la composición de los agregados, o más simplemente, los parámetros de volumen de la mezcla asfáltica.

Las propiedades volumétricas de una mezcla de pavimento compactado (vacíos de aire (V_a); vacíos en el agregado mineral (VMA); vacíos llenados con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo (P_{be}) proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica.

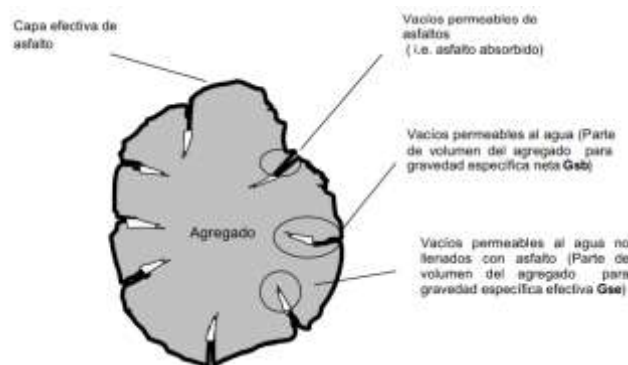
El agregado mineral es poroso y puede absorber agua y asfalto a un grado variable. Además, el cociente de absorción entre el agua y el asfalto varía con cada agregado. Los tres métodos para medir la gravedad específica del agregado toman estas variaciones en consideración. Estos métodos son, la gravedad específica neta, la aparente y la efectiva:

Gravedad específica neta, G_{sb} .— Proporción de la masa al aire de una unidad de volumen de un material permeable (incluyendo vacíos permeables e impermeables del material) a una

temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

Gravedad específica aparente, G_{sa} .— Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material impermeable a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada

Ilustración 10: Parámetros de diseños volumétricos.



Fuente: Referencia [20]

Gravedad específica efectiva, G_{se} .— Proporción de la masa en aire de una unidad de volumen de un material permeable (excluyendo vacíos permeables de asfalto) a una temperatura indicada, con respecto a una masa al aire de igual densidad de volumen igual al de agua destilada a una temperatura indicada.

Vacíos en el agregado mineral, VMA.— Volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, que incluye los vacíos de aire y el contenido de asfalto efectivo, expresado como un porcentaje del volumen total de la muestra.

Contenido de asfalto efectivo, P_{be} .— Contenido de asfalto total de

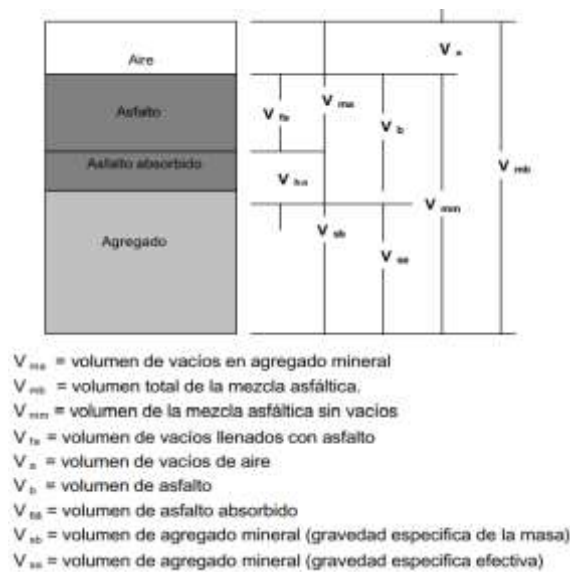
una mezcla asfáltica menos la proporción de asfalto absorbido en las partículas del agregado.

Vacíos de aire, V_a .— Volumen total de una pequeña bolsa de aire entre las partículas cubiertas del agregado en una mezcla de pavimento compactado, expresado como el porcentaje del volumen neto de la mezcla del pavimento compactado.

Vacíos llenados con asfalto, VFA.— Porción del porcentaje del volumen de espacio vacío intergranular entre las partículas del agregado, que es ocupado por el asfalto efectivo. Se expresa como la porción de $(VMA - V_a)$ entre VMA.

El procedimiento de diseño de mezcla, calcula los valores de VMA para las mezclas de pavimento en términos de la gravedad específica neta de los agregados, G_{sb} .

Ilustración 11: Componente del diagrama de compactación de una MAC.



Fuente: Referencia [20]

Los vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos de aire (V_a), se expresan como un porcentaje del volumen de la mezcla asfáltica. Los vacíos llenos de asfalto (VFA) son el porcentaje del VAM llenado con el asfalto efectivo. Dependiendo de cómo se

especifica el contenido de asfalto, el contenido de asfalto efectivo puede ser expresado como un porcentaje de la masa total de la mezcla asfáltica o como porcentaje de la masa del agregado de la mezcla asfáltica.

Debido a que el vacío de aire, VAM y VFA son cantidades de volumen; una mezcla asfáltica, primero debe ser diseñada o analizada sobre la base del volumen. Para propósitos de diseño, este acercamiento volumétrico puede ser fácilmente cambiado a valores masas, para proveer una mezcla de diseño. [20]

2.3.2.3. Requisitos de diseño de una MAC.

Las mezclas tradicionales se producen en base a granulometrías continuas densas. Estas mezclas, en condiciones extremas de servicio (carga y temperatura), suelen ahuellarse indefectiblemente. Para que una mezcla sea resistente al ahuellamiento, debe existir un contacto íntimo entre las partículas gruesas, ser más resistentes y de mayor fricción interna [21].

Un alto contenido de asfalto genera un efecto lubricante que reduce el contacto entre las partículas de los agregados disminuyendo así la fricción interna de la mezcla. Por lo tanto, con contenidos excesivos de asfalto se tendrá una mezcla más deformable y con mayor probabilidad de ahuellarse. [22]

Es por eso que las mezclas asfálticas diseñadas deben ser evaluadas de acuerdo a los criterios especificados en el Manual de Carreteras del Paraguay, que se indican en la siguiente ilustración.

Ilustración 12: Requerimientos para el diseño de Mezclas densas.

Parámetro		Exigencia																								
Ensayo Marshall (IRAM 6845)	N° golpes por cara (1)	75																								
	Estabilidad	> 10 kN																								
	Relación Estabilidad-Fluencia (2)	2.5 - 4.5 kN/mm																								
	Vacios en la mezcla (3)	3 - 5 %																								
	Vacios del agregado mineral (VAM) (3)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tamaño máximo nominal del agregado pétreo</th> <th>VAM</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>TMN 19 mm</td> <td>≥ 14 %</td> </tr> <tr> <td>TMN 12 mm</td> <td>≥ 15 %</td> </tr> </tbody> </table>		Tamaño máximo nominal del agregado pétreo	VAM	TMN 19 mm	≥ 14 %	TMN 12 mm	≥ 15 %																	
Tamaño máximo nominal del agregado pétreo	VAM																									
TMN 19 mm	≥ 14 %																									
TMN 12 mm	≥ 15 %																									
Relación Betún-Vacios (RBV)	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo de capa</th> <th colspan="4">RBV (%)</th> </tr> <tr> <th colspan="4">Clasificación por tránsito</th> </tr> <tr> <td></td> <th>T1</th> <th>T2</th> <th>T3</th> <th>T4</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Rodamiento</td> <td>65 - 75</td> <td>65 - 75</td> <td>65 - 78</td> <td>65 - 78</td> </tr> <tr> <td>Base</td> <td>68 - 78</td> <td>68 - 78</td> <td>70 - 80</td> <td>70 - 80</td> </tr> </tbody> </table>		Tipo de capa	RBV (%)				Clasificación por tránsito					T1	T2	T3	T4	Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78	Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80
Tipo de capa	RBV (%)																									
	Clasificación por tránsito																									
	T1	T2	T3	T4																						
Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78																						
Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80																						

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay

Si se verifican todas las exigencias, entonces se obtendrá el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en caso de que una de las exigencias se incumpla, se realizará algún reajuste o se diseña nuevamente la mezcla.

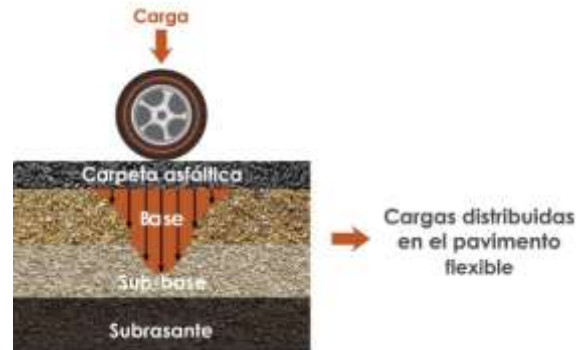
2.4. Pavimentos flexibles.

Los pavimentos flexibles son capas de asfalto que proporcionan una superficie de rodadura. Las cargas de los vehículos sobre la capa subyacente se distribuyen a través de las propiedades de fricción y cohesión de las partículas del material, y la capa de asfalto se dobla a pequeñas deformaciones de la capa subyacente sin dañar su estructura. Las capas que componen el pavimento flexible son:

- Carpeta Asfáltica.
- Base.

- Sub-base.

Ilustración 13: Estructura y comportamiento de un pavimento flexible ante la aplicación de cargas



Fuente: Pavimento Flexible. Guillermo Loira

Todas estas capas se construyen sobre la capa subrasante.

Es diseñado para un determinado número de repeticiones de carga, y al alcanzar este número de repeticiones, se espera que el pavimento se fatigue y falle, este fallo del pavimento se demuestra con la presencia de fisuras y grietas en la parte superficial. [24]

2.4.1. Características que debe reunir un pavimento.

Un pavimento para cumplir adecuadamente sus funciones debe reunir los siguientes requisitos:

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito.
- Ser resistente ante los agentes de intemperismo.
- Presentar una textura superficial adaptada a las velocidades previstas de circulación de los vehículos por cuanto ella tiene una decisiva influencia en la seguridad vial. Además, debe ser resistente al desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Debe presentar una regularidad superficial, tanto

transversal como longitudinal, que permitan una adecuada comodidad a los usuarios en función de las longitudes de onda de las deformaciones y de la velocidad de circulación.

- Debe ser durable.
- Presentar condiciones adecuadas respecto al drenaje.
- El ruido de rodadura, en el interior de los vehículos que afectan al usuario, así como en el exterior, que influyen en el entorno, debe ser adecuadamente moderado.
- Debe ser económico.
- Debe poseer el color adecuado para evitar reflejos y deslumbramientos, y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito. [23]

2.4.2. Tipos de fallas en pavimentos flexibles.

Antes de nada, definiremos como falla a las condiciones que se presentan en un pavimento, cuando este pierde las características de servicio para las que fue diseñado.

- **Falla estructural:** Es una deficiencia del pavimento que ocasiona, de inmediato o posteriormente una reducción de la capacidad de carga de éste. En su etapa más avanzada, la falla estructural se manifiesta en la obstrucción generalizada del pavimento, a la que se asocia precisamente el índice de servicio, no necesariamente implica una falla estructura inmediata, ya que lo primero es consecuencia de su incapacidad para soportar las cargas del proyecto.

-
- **Falla Funcional:** Consiste en deficiencias superficiales del pavimento a las que se asocian precisamente el índice de servicio, que afectan en mayor o menor grado la capacidad del camino en proporcionar al usuario un tránsito cómodo y seguro.

Los aspectos más importantes del pavimento que intervienen en el valor del índice de servicio actual son:

Las ondulaciones longitudinales.

Las deformaciones transversales.

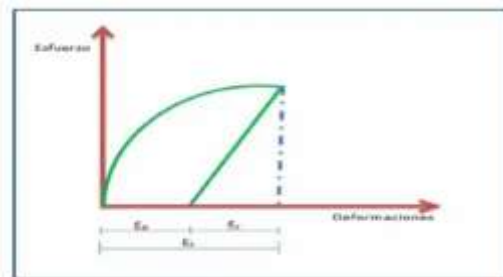
La textura de la superficie.

El porcentaje de baches y áreas reparadas. [25]

2.5. DEFORMACION PERMANENTE O AHUELLAMIENTO.

Existen dos tipos de falla principales en las mezclas asfálticas,

Ilustración 14: Curva típica esfuerzo - deformación en un ciclo de carga y descarga.



Fuente: Referencia [13]

que son la deformación permanente y el fisuramiento por fatiga. La deformación permanente es generada por deformación plástica del concreto asfáltico y/o por deformación de la subrasante. Cuando a un material granular se le inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total (ξ_t) que se genera es recuperada y se le conoce como la deformación resiliente (ξ_r). Aquella deformación que no se recupera se acumula con cada repetición del ciclo y se le denomina deformación permanente (ξ_p).

En un pavimento, estas deformaciones, si son excesivas, generan hundimientos o desplazamientos que se manifiestan en la superficie como ahuellamiento e, incluso, asentamientos de gran magnitud. La deformación “permanente” también se genera por la acumulación de pequeñas deformaciones que ocurren en cada capa, debido a la aplicación de carga, lo cual convierte esta deformación en irrecuperable.

En carpetas asfálticas, la deformación permanente ocurre debido al flujo viscoelástico o viscoplástico de la mezcla asfáltica. La capacidad de una mezcla de resistir este tipo de deformación depende de diversos factores, entre los cuales se puede considerar la consistencia del ligante asfáltico y la volumetría (porcentaje de vacíos de la probeta, relación betún / vacío, VAM) de la mezcla (agregados y ligantes). El ancho de carriles y la velocidad del tránsito también pueden inducir la deformación permanente.


Todas las mezclas asfálticas presentan distintas propiedades reológicas que dependen de las propiedades de cada asfalto, la proporción de los diferentes componentes, la distribución del tamaño de las partículas, la angularidad de los agregados y (su capacidad de densificarse rápidamente). Las propiedades de estas mezclas asfálticas también variarán con el tiempo, debido

al envejecimiento del ligante y desgaste de los agregados. El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende del tipo de ligante utilizado, la composición de la mezcla, la forma y tamaño de las partículas, la calidad de los agregados, y los aditivos, si son empleados. [26].

El Manual de Carreteras del Paraguay [14] define al ahuellamiento como: Depresiones Longitudinales en la zona de paso de los Neumáticos. Es el resultado de la compactación debido al tránsito y del correspondiente desplazamiento de la mezcla hacia los lados de la huella.

A continuación, se describen los métodos de inspección del ahuellamiento de acuerdo a lo especificado en el manual.

Ilustración 15: Método de inspección del ahuellamiento.

FE		FICHA DE FALLA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS	
TIPO DE FALLA:	AHUELLAMIENTO	HORA No.:	1 2
<p>1. DESCRIPCIÓN: Depresiones longitudinales canalizadas en la cara de piso de los neumáticos. Es el resultado de la compactación inadecuada al tránsito y del correspondiente desplazamiento de la mezcla hacia los lados de la falla.</p>			
<p>2. FOTO O ILUSTRACIÓN</p> 			
<p>3. MÉTODO DE INSPECCIÓN</p> <p>SEVERIDAD: Se mide la distancia vertical en centímetros, desde una regla de 2,5 metros de longitud apoyada en los bordes de la falla, hasta el fondo de la falla.</p>			
<p>4. CRITERIO CLASIFICACIÓN: La falta se clasifica en forma y se evalúa en orden de acuerdo a la siguiente tabla:</p>		EXTENSIÓN	EVALUACIÓN
		0 - 10 mm	B
		10 - 20 mm	M
		> 20 mm	M

FE		FICHA DE FALLA PAVIMENTOS ASFÁLTICOS									
TIPO DE FALLA:	AHUELLAMIENTO	HORA No.:	1 2								
<p>5. PROBABLES CAUSAS DE LA FALLA: Compactación y/o desplazamiento de una o más capas, debido a:</p> <ul style="list-style-type: none"> Baja estabilidad de las mezclas asfálticas. Falta de compactación en alguna de las capas. Falta de confinamiento lateral apropiado por la base. Escaso drenaje por la subbase, bajo la zona de rodadura. Subsistencia deformada por fatiga. 											
<p>6. OBSERVACIONES:</p>											
<p>7. POSIBLES ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>EVALUACIÓN</th> <th>ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>B</td> <td>No aplicar correctivos</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>Localizado: Recreo superficial Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento con lechada asfáltica o subcapa asfáltica.</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>Localizado: Recreo profundo - Fresa Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento de 20mm.</td> </tr> </tbody> </table>				EVALUACIÓN	ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO	B	No aplicar correctivos	M	Localizado: Recreo superficial Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento con lechada asfáltica o subcapa asfáltica.	M	Localizado: Recreo profundo - Fresa Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento de 20mm.
EVALUACIÓN	ACTIVIDAD DE MANTENIMIENTO										
B	No aplicar correctivos										
M	Localizado: Recreo superficial Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento con lechada asfáltica o subcapa asfáltica.										
M	Localizado: Recreo profundo - Fresa Generalizado: Pavimentación con mezcla y recubrimiento de 20mm.										

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay

2.5.1. Ahuellamiento por falla de la carpeta asfáltica.

Este tipo de deformaciones se manifiesta debido a la incapacidad de una mezcla asfáltica “blanda” de soportar cargas pesadas. Por ende, se acumula la deformación plástica en cada pulso de carga pesada, lo que tiene como resultado el ahuellamiento en la capa de asfalto. Ocurre mayormente durante el verano, cuando

el pavimento se encuentra sometido a altas temperaturas de servicio que sobrepasan los 60°C. Esto podría sugerir que las huellas son causadas por los rayos solares, pero es más correcto pensar que se origina por la falta de resistencia de la mezcla asfáltica, que depende de los agregados pétreos y el ligante asfálticos empleados. El ahuellamiento es producto de la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes.

Además, para incrementar la resistencia de la capa de mezcla asfáltica, estas trabajarán como un sólido elástico, lo cual les permitirá volver a su forma original cuando se retire la carga, es necesario que se comporte más como un sólido elástico a altas temperaturas. Con el fin de que al recibir una carga el material pueda recuperar su forma original. Para disminuir la aparición de huellas en el pavimento, se recomienda la utilización de asfaltos más “duros” y una mejor selección de agregados que proporcionen un alto grado de fricción interna. [26]

Ilustración 16: Ahuellamiento por falla en la mezcla asfáltica.



Fuente: Referencia [35]

2.5.2. Factores que influyen en la deformación permanente.

Algunos de los factores que pueden influir en la aparición de deformaciones en el pavimento son:

2.5.2.1. Granulometría de los agregados pétreos.

Existe suficiente evidencia que indica que las granulometrías

densas son las deseables en la elaboración de las mezclas asfálticas debido a que mitigan los efectos de las roderas. Cuando las mezclas asfálticas densas o de granulometrías continuas, se compactan propiamente se logran mezclas con menor porcentaje de vacíos y con mayores puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta. [13]

2.5.2.2. Forma, Tamaño y Textura de los agregados pétreos.

Para una buena resistencia a las roderas, la textura de la superficie del agregado juega un papel extremadamente importante. Particularmente en espesores gruesos de capas de asfalto y en climas calientes o en donde se requiera textura superficial rugosa. La forma de la partícula es muy importante.

El esqueleto mineral contribuye a la componente elástica del material; su forma y textura influye en las propiedades elásticas de las mezclas asfálticas, así como la compactación, ya que un esqueleto mineral bien compactado tiene un mayor comportamiento elástico. [13]

2.5.2.3. Contenido de Polvo Mineral (Filler) en la mezcla.

El polvo mineral junto con la ligante forma una masa asfáltica cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica. Los factores que intervienen para conseguir un buen mastico son diversos:

- a) La relación Polvo Mineral / Asfalto de manera que cuanto más alta es esta relación, más elevada es la viscosidad de masa y más rígida es la mezcla.
- b) La Finura del Polvo Mineral y su afinidad por el agua. Estos dos factores están relacionados en muchos casos, pero también

pueden ser bastante independientes. Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia conservada en ensayo de inmersión –compresión. Con este ensayo puede detectarse con aceptable precisión el riesgo de degradación de la mezcla por la acción del agua sobre sus componentes minerales más finos.

El riesgo de sensibilidad al agua del mortero de la mezcla puede deberse no solamente a la naturaleza del polvo mineral sino también a ciertas composiciones químicas de algunos asfaltos.

El polvo mineral tiene un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas asfálticas por su elevada superficie específica, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. Puede ser el contenido en los áridos procedente de la trituración de los mismos, un producto comercial de naturaleza pulverulenta como el cemento o la ceniza volante procedente de central térmica o un polvo en general calizo especialmente preparado para este fin.

El Polvo Mineral o Filler forma parte del esqueleto mineral y por lo tanto soporta las tensiones por rozamiento interno o por contacto entre las partículas. [13]

2.5.2.4. Tipo de Ligante Asfáltico.

Cuando los ligantes asfálticos son poco viscosos, provocan que las mezclas asfálticas sean muy susceptibles a las deformaciones plásticas o a la formación de roderas, por eso se recomienda utilizar cementos asfálticos más duros (mayor viscosidad) en los climas cálidos para la construcción de

pavimentos. [27]

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añade a la mezcla, aunque sea de similar penetración.

El punto de reblandecimiento puede valorar la aportación de los ligantes asfálticos convencionales a la resistencia a las deformaciones plásticas de las mezclas, pero no es válido cuando se incluyen asfaltos modificados. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

El empleo de asfaltos de baja penetración y asfaltos modificados disminuyen el riesgo de las deformaciones plásticas. [13]

2.5.2.5. El Tránsito.

El tránsito tiene una gran influencia en la aplicación de las cargas en un pavimento y su caracterización es bastante compleja debido no solo a la variabilidad de los distintos vehículos existentes, sino también a las interacciones vehículo-pavimento que producen fenómenos con solicitaciones adicionales a las propias cargas estáticas del tránsito.

Para caracterizar las solicitaciones producidas por el tránsito a un pavimento se pueden estudiar independientemente los siguientes aspectos:

Magnitud de las cargas según la composición del tránsito (carga

por eje, número de ejes que circulan, y número de repeticiones de carga).

Forma geométrica de cada sollicitación sobre el pavimento (área de contacto y reparto de presiones sobre la misma).

Velocidad de los vehículos y tiempo de sollicitación en un punto.

Estados de esfuerzos que producen las cargas, en función de su magnitud y tipología (verticales, tangenciales, fenómenos de impacto, etc. [28]

2.5.2.6. La temperatura.

Las mezclas asfálticas pueden tener un comportamiento elástico lineal, elástico no lineal o viscoso en función de la temperatura y el tiempo de aplicación de la carga. A bajas temperaturas el comportamiento es fundamentalmente elástico lineal, y al aumentar la temperatura se empieza a comportar como un material elástico no lineal, apareciendo el comportamiento viscoso a medida que la temperatura continúa aumentando. [13]

En Verano, a altas temperaturas, la cohesión de la mezcla disminuye y las deformaciones originadas por el tráfico se incrementan. Parte de estas deformaciones se dan en la componente viscosa de la mezcla, no siendo recuperables y apareciendo las deformaciones plásticas permanentes o ahuellamientos. [13]

Ilustración 17: Temperaturas máximas registradas en Verano 2022



Fuente: DINAC (Dirección de Meteorología e Hidrología)

2.5.3. Evaluación del ahuellamiento en el laboratorio.

Los ensayos de laboratorio tienen la finalidad de tratar de reproducir al máximo posible, lo que le que ocurre en un pavimento cuando se le aplican las cargas, se pueden evaluar deformaciones bajo condiciones de temperatura, humedad, esfuerzos y condiciones generales de los materiales y al final se puede obtener un dictamen en el que se puedan analizar las características y comparar con los requisitos o normas fijadas.

Estos ensayos ayudan a que los pavimentos puedan ser previamente analizados antes de su colocación, o bien después de su colocación, y existen unos ensayos más aproximados a la realidad que otros. [13]

Ilustración 18: Equipo de WTT



Fuente: *Propia.*

El método utilizado, de acuerdo a lo descrito en el Manual de Carreteras del Paraguay es el Ensayo de rueda cargada – Wheel tracking test conforme a la norma EN 12697-22.

El ensayo de rueda cargada ha sido desarrollado para evaluar, de forma racional, la performance de una mezcla frente al ahuellamiento en laboratorio. La configuración del ensayo consta básicamente de una rueda, la cual aplica una carga sobre la mezcla asfáltica a la vez que circula sobre esta. [22]

Los requisitos para la resistencia al ahuellamiento se establecen en la Tabla 5.2_58 del Manual de Carreteras.

Ilustración 19: Requisitos de la resistencia al ahuellamiento.

TABLA 5.2_58. EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO “WHEEL TRACKING TEST”

Pendiente Media de Deformación (WTS AIRE) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTS aire ≤ 0,08 PRD ≤ 5%	WTS aire ≤ 0,10 PRD ≤ 8%	WTS aire ≤ 0,12 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 10%
Base	WTS aire ≤ 0,10 PRD ≤ 8%	WTS aire ≤ 0,12 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 12%

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay.

Los requisitos de los materiales componentes de las mezclas asfálticas, como así también los criterios de dosificación de las mismas, se encuentran diferenciados en el Pliego de especificaciones Técnicas, de acuerdo a la ubicación en el paquete estructural (base o rodamiento) que cada una ocupa y de la Clasificación por Tránsito prevista. [14]

En la siguiente ilustración se exponen los cuatro niveles de Clasificación por Tránsito considerados por el Manual de Carreteras del Py.

Ilustración 20: Clasificación por tránsito.

TABLA 5.2_11. CLASIFICACIÓN POR TRÁNSITO

---	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Índice de tránsito (IT)	≥1500	800-1499	200-799	≤199

Donde:

- IT: Índice de Tránsito = $TMDA_d \cdot \%P_d$
- $TMDA_d$ = Tránsito Medio Diario Anual de diseño
- $\%P_d$ = % Pesados de diseño

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay.

CAPITULO 3 METODOLOGIA.

La metodología planteada para esta investigación es del tipo experimental, ya que se fueron realizando distintos tipos de ensayos para determinar las propiedades de cada mezcla, y comparando sus resultados ante la verificación al ahuellamiento.

La ejecución del mismo se llevó a cabo en tres etapas:

- 1- Implicó la recolección de información y datos referentes a la carpeta existente, la respectiva medición de lisura de las deformaciones in situ, los tipos de agregados y cemento asfáltico utilizados.

Los agregados utilizados fueron obtenidos de la cantera de la empresa Tecnoedil S.A. ubicada en el distrito de Caaguazú como también el Cemento Asfáltico convencional 50/70 (utilizado en la carpeta asfáltica del tramo en estudio) fue obtenida de la planta asfáltica ubicada en el mismo sitio. El CAP modificado tipo 1, fu proveído por la empresa Al Dia S.A. para la realización de este trabajo de investigación.

- 2- Se realizaron los ensayos de laboratorio teniendo en cuenta las especificaciones técnicas de la obra y el Manual de Carreteras del Paraguay.

Se llevaron a cabo los ensayos de caracterización de los agregados para la comprobación de la calidad y cumplimiento de las exigencias establecidas:

- Desgaste de los Ángeles
- Granulometría
- Determinación del polvo adherido
- Ensayo de adherencia (agregado-ligante)

- Peso específico
- Densidad relativa y aparente
- Durabilidad por ataque de sulfatos
- Equivalente de arena
- Límites de Atterberg
- Ensayo de Cubicidad
- Concentración crítica
- Índice de lajas
- Micro Deval
- Elongación

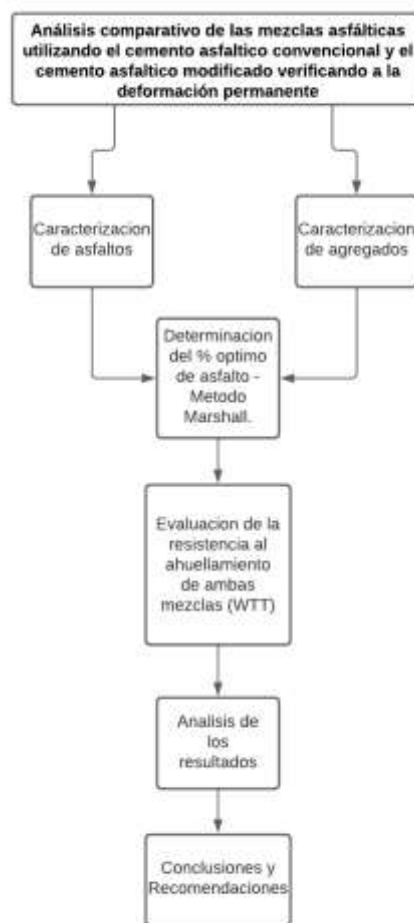
Así también, para los dos tipos de cemento asfáltico se realizó:

- Ensayo de penetración
- Determinación del punto de ablandamiento
- Torsión elástica (CAP modificado)
- Viscosidad
- Punto de inflamación y punto de fulgor
- Ductilidad
- RFTOT
- Ensayo de adhesividad con el asfalto
- Ensayos sobre el residuo.

Para determinar el comportamiento mecánico de la mezcla y el porcentaje óptimo de asfalto se realizaron ensayos por el método Marshall (ASTM D 1559), que se obtuvieron de los resultados del análisis de densidad, estabilidad, flujo y porcentaje de vacíos.

3- Finalmente se realizó el análisis comparativo de los resultados obtenidos de los ensayos realizados tanto del Método Marshall y el de rueda cargada utilizando el Wheel Tracking Test según la norma (UNE EN 12697-22 (Procedimiento B)) llevado a cabo en el Centro de Desarrollo Tecnológico Vial del MOPC.

Ilustración 21: Flujograma de la metodología utilizada.



Fuente: Propia.

CAPITULO 4 MARCO EXPERIMENTAL

En este capítulo, se encuentra toda la información respecto a los ensayos de laboratorio, normas utilizadas y métodos experimentales empleados durante el proceso de realización de la investigación, los mismos incluyen la selección de materiales, el estudio de sus características, el diseño de mezcla con ambos tipos de cementos asfálticos y el análisis de ambas mezclas ante la deformación permanente.

Los trabajos previos a la realización del diseño de mezcla, fueron la caracterización de los agregados (grueso, intermedio y fino) que fueron extraídos de la cantera Tecnoedil ubicada en el departamento de Caaguazú, el cemento asfáltico modificado tipo 1 (Polímero) fue proveído por la empresa AL DIA S.A. y el normal 50/70 de la planta asfáltica de la empresa Tecnoedil.

A continuación, se describen los procesos realizados:

4.2. Caracterización del agregado.

4.2.1. Selección del material.

El material se obtuvo de la Cantera de la empresa Tecnoedil S.A. ubicada en la compañía de Guyraungua del departamento de Caaguazú.

Ilustración 22: Cantera Tecnoedil -
Recolección de materiales.



Fuente: Propia.

4.2.2. Método para el cuarteo de muestras (ASTM C 702).

Para la realización de los ensayos es necesario reducir las muestras de los agregados a utilizar para obtener una muestra representativa, para este método utilizamos el procedimiento con cuarteador metálico.

Ilustración 23: Cuarteo de muestras.



Fuente: Propia

Los demás ensayos de caracterización de materiales, fueron realizados de acuerdo a las normas de vialidad argentina, que fue la referencia para las especificaciones técnicas de la obra, complementando la información conforme a lo indicado en el Manual de Carreteras del Paraguay y se resumen en la siguiente tabla

Tabla 2: Ensayos de caracterización de agregados pétreos.

CARACTERIZACION DE AGREGADOS PETREOS						
Estudiante: Nathalia Arammi Benitez Cáceres.						
Ensayo	Agregado	Norma Utilizada	UM	Resultado	Especificaciones	
					Exigencia	Anexo
Gravedad especifica bulk , (Gsb)	AGREGADO GRUESO	IRAM 1533	gr/cm3	2.816	-	Agregados pétreos
Gravedad especifica sss , Gssss=B/[B-C]		IRAM 1533	gr/cm3	2.831	-	
Gravedad especifica aparente , Gsa=A/[A-C]		IRAM 1533	gr/cm3	2.858	-	
Absorcion		IRAM 1533	%	0.52%	≤1.2%	
Índice de lajas		IRAM 1687-1	%	24.32%	≤25%	
Índice de elongacion		IRAM 1687-1	%	10.12%	-	
Factor de cubicidad		VN-E16-67	%	0.98%	0.5-1.0	
Durabilidad por ataque con sulfato de sodio		IRAM 1525	%	0.10%	≤10%	
Coefficiente de desgaste "Los Angeles"	IRAM 1532	%	24.20%	≤25%		
Gravedad especifica bulk , Gsb	AGREGADO INTERMEDIO	IRAM 1533	gr/cm3	2.791	-	
Gravedad especifica sss , Gssss		IRAM 1533	gr/cm3	2.817	-	
Gravedad especifica aparente , Gsa		IRAM 1533	gr/cm3	2.866	-	
Absorcion		IRAM 1533	0	0.95%	≤1.2%	
Índice de lajas		IRAM 1687-1	%	12.20%	≤25%	
Índice de elongacion		IRAM 1687-1	%	11.45%	-	
Povo adherido		IRAM 1883	ml	0.80%	≤1,2%	
Factor de cubicidad		VN-E16-67	%	0.89%	0.5 - 1.0	
Micro Deval	IRAM 1762	%	7.73%	≤20%		
Gravedad especifica bulk , Gsb=A/[B-C]	AGREGADO FINO	IRAM 1533	gr/cm3		-	
Gravedad especifica sss , Gssss=B/[B-C]		IRAM 1533	gr/cm3		-	
Gravedad especifica aparente , Gsa=A/[A-C]		IRAM 1533	gr/cm3		-	
Absorcion		IRAM 1533	%		≤1.2%	
Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz IRAM 425 µm		IRAM 10501		Ensayo impracticable . No plastico	No plastico	
Plasticidad de la fracción que pasa el tamiz		IRAM 10501			≤4%	
Equivalente de arena		IRAM 1682	%	81.65%	≥50%	
Peso especifico		Cal	VN-E15-89	gr/cm3	2.284	-

Fuente: Propia.

4.3. Caracterización del Cemento Asfáltico.

Para este trabajo, fueron utilizados dos tipos de cementos asfálticos, el cemento asfáltico normal 50/70 que fue utilizado en la mezcla asfáltica del tramo en estudio, y como propuesta se utilizó el Cemento asfáltico 50/70 modificado tipo 1, que fue proveído por la empresa ALDIA S.A. ((Almacenamiento y distribución de asfaltos S.A.

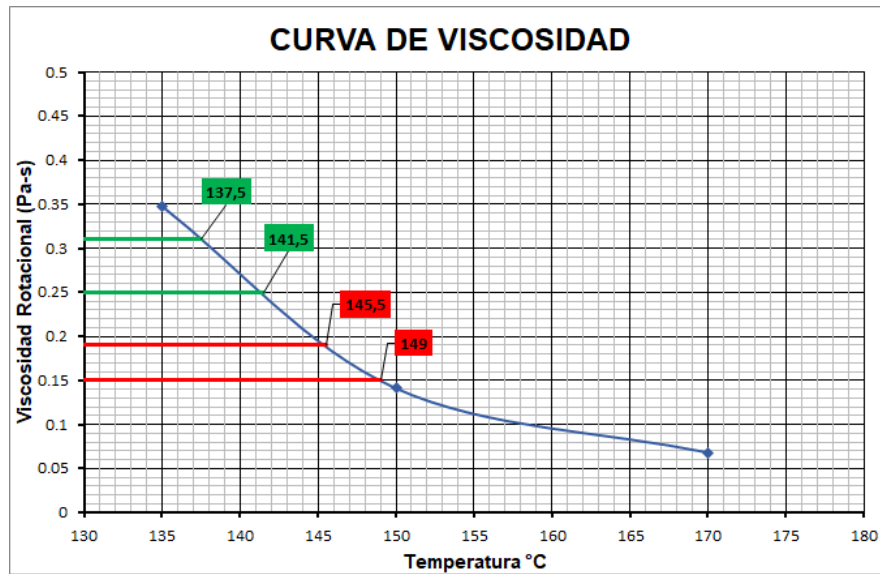
A continuación, se detallan los resultados obtenidos:

Tabla 3: Resultados de los ensayos de caracterización del asfalto normal 50/70.

CARACTERIZACION DE ASFALTO NORMAL 50/70					
Ensayo	Norma	Unidad	Resultado	Especificaciones	
				Min	Max
Penetracion a 25 °C	IRAM 6576	mm	57.3	50	70
Punto de Fulgor	IRAM 6555	°C	260	235	-
Punto de Ablandamiento	IRAM115	°C	47.3	46	-
Viscosidad Brookfield 135	IRAM 6836	cP	348	274	-
Viscosidad Brookfield 150	IRAM 6837	cP	141	112	-
Viscosidad Brookfield 177	IRAM 6838	cP	70	57	285
Ductilidad a 25°C	IRAM 6579	cm	85.75	60	-
Sobre el residuo					
Variacion de masa %	ASTM D 1754	%	0.96		1
Penetracion a 25 °C	IRAM 6576	mm	42.5		
Puno de ablandamiento	IRAM115	°C	55.58		
Ductilidad a 25°C	IRAM 6579	cm	61.75		

Fuente: Propia.

Ilustración 24: Curva de viscosidad - Asfalto normal 50/70



Fuente: Propia

En los ensayos de viscosidad realizados al cemento asfáltico convencional 50/70, es posible determinar el rango de temperatura de mezclado correspondiente a la viscosidad igual a 0.17 ± 0.02 Pa.s, y el rango de temperatura de compactación correspondiente a la viscosidad igual 0.28 ± 0.03 Pa.s. Se puede observar que los resultados obtenidos cumplen con las especificaciones de dicho material recomendadas por el proveedor.

En la **Ilustración 24**, se puede contemplar que existe una relación entre viscosidad y temperatura realizados al cemento asfáltico convencional, siendo la temperatura de mezclado $139,5 \pm 2^\circ\text{C}$ y la temperatura de compactación $147,25 \pm 1.75^\circ\text{C}$.

El [7] denomina a este método de determinación de las temperaturas de mezclado y compactación como “principio de equiviscosidad”.

Tabla 4: Resultados de los ensayos de caracterización del cemento asfáltico 50/70 modificado tipo 1.

CARACTERIZACION DE ASFALTO 50/70 MODIFICADO TIPO 1.					
Ensayo	Norma	Unidad	Resultado	Especificaciones	
				Min	Max
Penetracion a 25 °C	IRAM 6576	mm	69	50	70
Punto de Fulgor	IRAM 6555	°C	274	230	-
Punto de Ablandamiento	IRAM115	°C	56	50	-
Viscosidad Brookfield 135 °C	IRAM 6836	cP	619	-	3000
Viscosidad Brookfield 150 °C	IRAM 6837	cP	334	-	2000
Viscosidad Brookfield 177 °C	IRAM 6838	cP	120	-	1000
Recuperacion elastica torsional 25 °C	IRAM 6830	%	64	50	-
Ductilidad a 25°C	IRAM 6579	cm	61	60	-
Sobre el residuo					
Variacion de masa %	IRAM 6582	%	0.99	-	1
Penetracion a 25 °C	IRAM 6576	mm	44.8		
Punto de ablandamiento	IRAM115	°C	53.86		
Ductilidad a 25°C	IRAM 6579	cm	20.25		

Fuente: Propia.

Sobre el ligante asfáltico modificado tipo 1, los rangos de viscosidad para mezclar y compactar utilizados para asfaltos tradicionales, no se aplican para asfaltos modificados, debido a que los mismos se comportan como un fluido no-newtoniano, lo que ocasionan que se obtengan temperaturas muy elevadas y no realistas. Esto ha llevado a que las temperaturas de mezclado y compactación para asfaltos modificados sean recomendadas por el proveedor del asfalto modificado o por el proveedor del polímero. Para este caso, de acuerdo al fabricante la temperatura de mezclado recomendada se encuentra entre 157,5 °C y 164 °C, y para la compactación entre 147 °C y 157,5 °C.

En general se puede observar que ambos tipos de asfaltos, cumplen con los rangos de especificaciones indicadas para cada uno.

4.4. Diseño de mezcla.

4.4.1. Preparación del agregado y dosificación.

Ilustración 25: Ensayo de granulometría de agregados finos y gruesos.



Fuente: Propia.

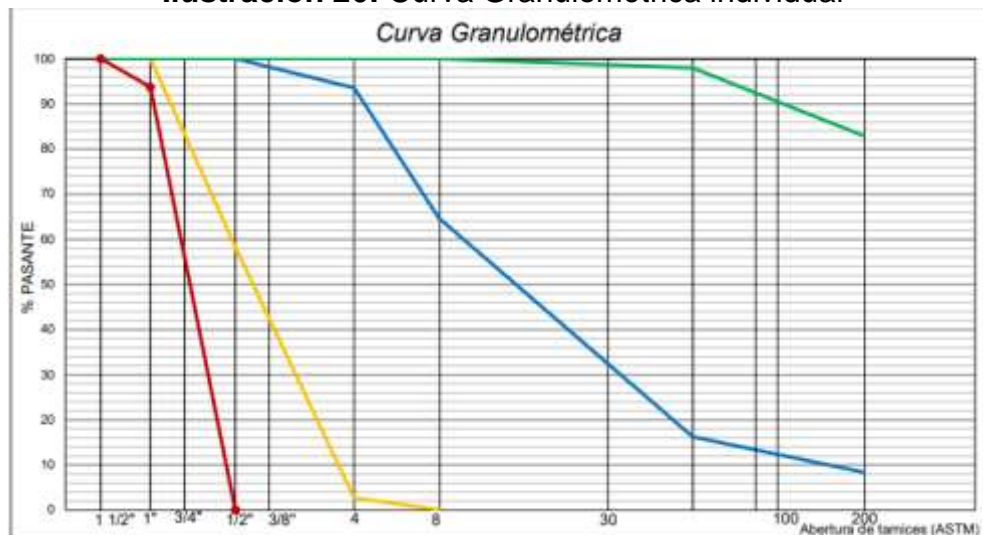
Primeramente, se realizan las granulometrías individuales de cada agregado a utilizar, se seleccionan los tamices de acuerdo a las especificaciones requeridas de la obra, y posteriormente se seca y pesa cada muestra de material, para luego realizar el tamizado donde fui registrando los pesos y pasantes para elaborar las curvas granulométricas de los agregados gruesos, intermedios y finos.

Tabla 5: Análisis de granulometría individual de los agregados.

		ANÁLISIS DE GRANULOMETRIA INDIVIDUAL									
		Material: Agregado grueso, intermedio y fino.									
Progresiva		4ta		5ta		8ta		Filler			
Muestra		Peso gr.	%	Peso gr.	%	Peso gr.	%	Peso gr.	%		
Tamiz	Total	3,052.7	10	2,162.2	41	1,542.1	48	200.0	1		
1 1/2"	Ret.	0.0		0.0							
	Pas.	3,052.7	100.0	2,162.2	100.0						
1"	Ret.	192.5		0.0							
	Pas.	2,860.2	93.7	2,162.2	100.0						
1/2"	Ret.	2,859.8		902.5		0.0					
	Pas.	0.4	0.01	1,259.7	58.3	1,542.1	100.0				
4	Ret.			1,200.8		99.8					
	Pas.			58.9	2.7	1,442.3	93.5				
8	Ret.			56.9		446.1		0.0			
	Pas.			2.0	0.09	996.2	64.6	200.0	100.0		
50	Ret.					746.8		4.0			
	Pas.					249.4	16.2	196.0	98.0		
200	Ret.					121.1		30.1			
	Pas.					128.3	8.3	165.9	83.0		

Fuente: Propia.

Ilustración 26: Curva Granulométrica individual



Fuente: Propia.

La granulometría resultante de la mezcla o composición de las diferentes fracciones de agregados, debe estar comprendida dentro de los límites establecidos según la norma ASTM D3515, específicamente el Huso 3, que fue seleccionada como faja de diseño para la mezcla asfáltica utilizada en obra.

Ilustración 27: Fajas granulométricas para mezclas densas.

Tamiz	Tamaño máximo nominal del agregado				
	(1 1/2")	(1")	(3/4")	(1/2")	(3/8")
Porcentaje acumulado que pasa (por peso)					
50 mm (2")	100	100			
37.5 mm (1 1/2")	90-100	100			
25.0 mm (1")		90-100	100		
19.0 mm (3/4")	56-80		90-100	100	
12.5 mm (1/2")		56-80		90-100	100
9.5 mm (3/8")			56-80		90-100
4.75 mm (Nº 4)	23-53	29-59	35-65	44-74	55-85
2.36 mm (Nº 8)*	15-41	19-45	23-49	28-58	32-67
0.30 mm (Nº 50)	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23
0.15 mm (Nº 100)					
0.075 mm (Nº 200)**	0-5	1-7	2-8	2-10	2-10
Cemento asfáltico, % en peso de la mezcla total***	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12
	4 y 67 o 4 y 68	5 y 7 o 57	67 o 68 o 6 y 8	7 o 78	8

Fuente: Referencia [3]

Tabla 6: Análisis granulométrico de la mezcla de agregados.

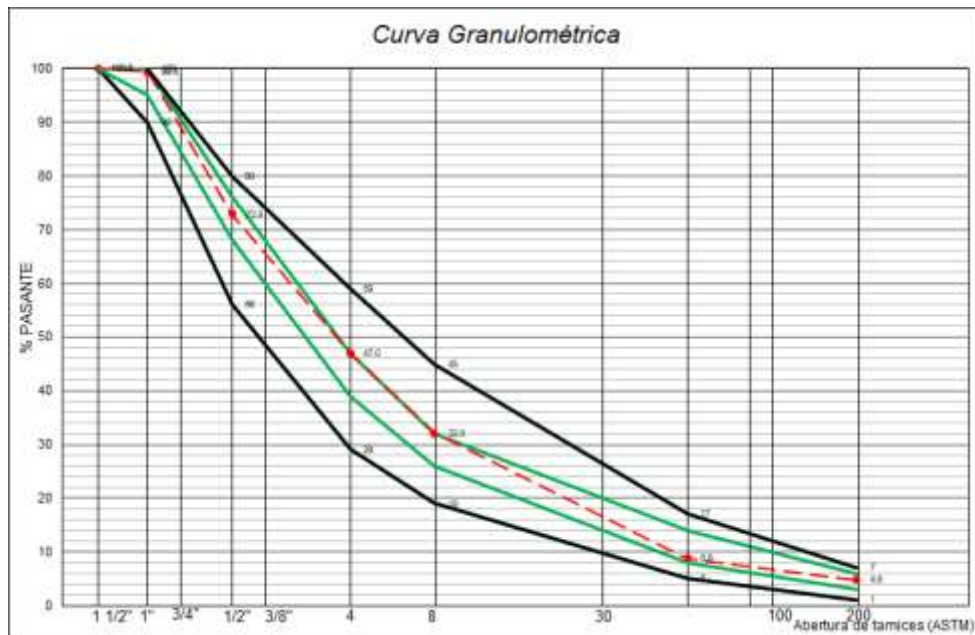
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA COMBINACION												
Material: Agregado grueso, intermedio y fino												
Norma: ASTM D3515												
TMN: 1"												
Muestra	4ta		5ta		6ta		Filler		Faja de trabajo		Faja de diseño	
Tamiz	Peso gr.	%	Peso gr.	%	Peso gr.	%	Peso gr.	%	Mezcla			
1 1/2"	Ret.								100.0	100	100	100
	Pas.	100.0	100.0	100.0	100.0							
1"	Ret.								99.4	95	100	90
	Pas.	93.7	100.0	100.0	100.0							100
1/2"	Ret.								72.9	68	76	56
	Pas.	0.01	58.3	100.0	100.0							80
4	Ret.								47.0	39	47	29
	Pas.	0.0	2.7	93.5	100.0							59
8	Ret.								32.0	26	32	19
	Pas.		0.09	64.6	100.0							45
50	Ret.								8.8	8	14	5
	Pas.		0.0	16.2	98.0							17
200	Ret.								4.8	3	6	1
	Pas.			8.3	83.0							7

Fuente: Propia.

Se verifican que los agregados cumplan con la faja de diseño adoptada y se encuentren dentro de la faja de trabajo de la especificación de obra.

Una vez verificados que la mezcla resultante se encuentre dentro de los límites, se realiza el grafico de la curva granulométrica resultante.

Ilustración 28: Curva granulométrica de la combinación de agregados.



4.4.2. Concentración crítica y volumétrica del Filler.

Uno de los métodos utilizados para elevar la estabilidad de las mezclas asfálticas es el uso de filler.

La dirección nacional de vialidad de la provincia de Buenos Aires, ha adoptado el criterio de concentración crítica para la dosificación del filler en mezclas asfálticas densas preparadas en caliente, y en estos últimos años lo utiliza también el Manual de Carreteras del Paraguay.

Este criterio sirve para conocer la máxima dosificación de filler para el tipo de mezcla, orientando a conservar la flexibilidad de la misma evitando un exceso del filler, considerando que la incorporación óptima del filler a las mezclas asfálticas aporta propiedades como resistencia a la deformación o estabilidad, durabilidad y ayuda a mejorar la adherencia entre el betón y

el agregado.

A continuación, se detalla los requisitos de concentración Crítica para la dosificación de las mezclas.

Ilustración 29: Requisitos de Concentración crítica para Dosificación.

Relación C/C_c para carpeta	Menor o igual a 1
Siendo:	
$C =$	Concentración en volumen de "Filler" en el sistema Filler betún (considerándose "Filler" a la fracción de la mezcla de áridos que pasa por el tamiz N°200)
$C_c =$	Concentración crítica del "Filler". Norma de ensayo V.N.E.-11.

Fuente: Especificaciones Técnicas – Obra: Duplicación de calzada – Tape Porä.

El Filler utilizado en la elaboración de las mezclas en la presente tesis, estuvo compuesto por el proveniente de la fracción de los áridos que pasa el tamiz N° 200 (0,075 mm) y por cal hidratada en carácter de filler de aportación. El conjunto de ambos materiales se designará a partir de ahora filler total de la mezcla.

1- Se procedió a la obtención de la Concentración crítica (C_s) para el filler total de la mezcla.

Tabla 7: Concentración Crítica del Filler Total

1-CALCULO DE LA CONCENTRACIÓN CRÍTICA C_s DEL FILLER TOTAL								
Gravedad Específica Aparente de Rellenos Minerales VN - E15-89								
Solvente: Kerosene Anhidrido								
Prueba			6ta	Cal				
Peso de la Muestra		[g]	48.4	52.5				
Vol. Desplazado		[cm ³]	20.4	18.0				
Peso Especifico Aparente		[g/cm ³]	2.373	2.917				
Del Ensayo								
Material		Peso gr	Volumen ml	Pasa #200 %	Composicion			
Trit 6ta Pasa 200		11.3	10.0	8.4	Árido	95.4		
Cal Pasa 200		3.3	9.5	83	Asfalto	4.6		
Tipo de Aridos	% Aporte	Pasa # 200 (%)	% Aporte a	P.E.A. (Kg/dm ³) b	Prop. c	Conc. Crit. (Cs) d	b x d e	V' a / e f
6ta	48.0	8.4	4.03	2.917	1.382	0.387	1.130	3.568
Filler	1.0	83.0	0.83	2.373	0.350	0.146	0.347	2.389
TOTAL	49.0		4.86		1.732			5.958
Peso Especif. Filler Total = % Aporte total/P.E.A. prop.total =						2.807		
Cs del Filler total = % Aporte total / (V' total * P.E.A. prop. total) =						0.291		
						Cs= 0.291		

Fuente: Propia

Cabe mencionar que esta concentración representa el valor máximo que puede emplearse al utilizar Filler como medio de incrementar la consistencia del betún asfáltico y con ello la estabilidad de la mezcla sin sacrificar su flexibilidad.

2- A continuación, se procede a la determinación de la concentración volumétrica (Cv) para cada tipo de cemento asfáltico utilizado.

Tabla 8: Concentración Volumétrica - Cemento Asfáltico Normal 50/70.

2.- CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA Cv DEL FILLER TOTAL			
Composición:	Árido	95.50	
	Asfalto	4.50	
		100.0	
Aporte de Filler (%) = % de AporteTotal x % en la composición =			4.643
Volumen de Filler = Aporte de Filler / P.E.Filler total =			1.654
Concentración volumétrica Cv = Vol. Filler / (Vol. Filler + % Asfalto) =			0.269
RELACIÓN Cv / Cs =			0.924
Para Ligante Asfáltico Convencional Cv/Cs =			≤ 1,0
Para Ligante Asfáltico Modificado Cv/Cs =			≤ 1,1
			Cv= 0.269

Fuente: Propia.

Cv/Cs= 0.924 ≤ 1 entonces “cumple”

Tabla 9: Concentración volumétrica - Cemento asfáltico modificado tipo 1.

2.- CÁLCULO DE LA CONCENTRACIÓN VOLUMÉTRICA Cv DEL FILLER TOTAL			
Composición:	Árido	95.40	
	Asfalto	4.60	
		100.0	
Aporte de Filler (%) = % de AporteTotal x % en la composición =			4.638
Volumen de Filler = Aporte de Filler / P.E.Filler total =			1.653
Concentración volumétrica Cv = Vol. Filler / (Vol. Filler + % Asfalto) =			0.264
RELACIÓN Cv / Cs =			0.909
Para Ligante Asfáltico Convencional Cv/Cs =			≤ 1,0
Para Ligante Asfáltico Modificado Cv/Cs =			≤ 1,1
			Cv= 0.264

Fuente: Propia.

Cv/Cs= 0.909 ≤ 1,1 entonces “cumple”

4.4.3. Método Marshall.

Tabla 10: Requisitos Marshall para la Dosificación de Mezclas.

Parámetro		Exigencia			
Ensayo Marshall (IRAM 6845)	N° golpes por cara (1)	75			
	Estabilidad	> 10 kN			
	Relación Estabilidad-Fluencia (2)	2,5 - 4,5 kN/mm			
	Vacios en la mezcla (3)	3 - 5 %.			
	Vacíos del agregado mineral (VAM) (4)	Tamaño máximo nominal del agregado pétreo	VAM		
		TMN 19 mm	≥ 14 %		
TMN 12 mm		≥ 15 %			
Relación Betón-Vacios (RBV)	Tipo de capa	RBV (%)			
		Clasificación por tránsito			
		T1	T2	T3	T4
	Rodamiento	65 - 75	65 - 75	65 - 78	65 - 78
	Base	68 - 78	68 - 78	70 - 80	70 - 80

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay.

Procedimiento de diseño:

1- Elaboración de probetas Marshall.

Para este ensayo se emplean 5 porcentajes de líquido asfáltico que son: 3.5% - 4% - 4.5% - 5% - 5.5%, manteniéndose estas cantidades para la mezcla asfáltica fabricada con CA normal 50/70 y el CA modificado tipo 1, manteniendo en ambas mezclas una misma granulometría.

A continuación, se detallan las dosificaciones correspondientes para las probetas.

a) Para 3.5% de CA.

Tabla 11: Separación de agregados por retenido para 3.5% de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 3.50 %

Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{3.5 \times 10.0}{100}$	9.7		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.097 \times 1,200.0$	7.3
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.097 \times 1,200.0$	108.5
4	0.0	0.0				$0 \times 0.097 \times 1,200.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.097 \times 1,200.0$	0.0
							115.8

Agregado Tipo: 5ta

1"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{3.5 \times 41.0}{100}$	39.6		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.396 \times 1,200.0$	198.0
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.396 \times 1,200.0$	264.0
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.396 \times 1,200.0$	12.4
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.396 \times 1,200.0$	0.4
							474.8

Agregado Tipo: 6ta

1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{3.5 \times 48.0}{100}$	46.3		
4	98.7	1.3				$0.013 \times 0.463 \times 1,200.0$	7.2
8	64.7	34.0				$0.34 \times 0.463 \times 1,200.0$	189.0
50	16.3	48.4				$0.484 \times 0.463 \times 1,200.0$	269.0
200	8.4	7.9				$0.079 \times 0.463 \times 1,200.0$	43.9
Fondo	0.0	8.4				$0.084 \times 0.463 \times 1,200.0$	46.7
							555.8

Relleno de Agregado: Mineral

			1,200.0	$100 - \frac{3.5 \times 1.0}{100}$	0.97	$0.010 \times 1,200.0$	11.6
--	--	--	---------	------------------------------------	------	------------------------	------

C. A. P.

			1,200.0		3.50	$0.035 \times 1,200.0$	42.0
				PESO x PROBETA= 1200 gr	100.0		1,200.0

Fuente: Propia.

b) Para 4% de CA.

Tabla 12: Separación de agregados por retenido para 4% de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta			% de Asfalto: 4.00 %				
Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.0 \times 10.0}{100}$	9.6		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.096 \times 1,200.0$	7.3
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.096 \times 1,200.0$	107.9
4	0.0	0.0				$0 \times 0.096 \times 1,200.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.096 \times 1,200.0$	0.0
							115.2
Agregado Tipo: 5ta							
1"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.0 \times 41.0}{100}$	39.4		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.394 \times 1,200.0$	197.0
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.394 \times 1,200.0$	262.6
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.394 \times 1,200.0$	12.3
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.394 \times 1,200.0$	0.4
							472.3
Agregado Tipo: 6ta							
1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.0 \times 48.0}{100}$	46.1		
4	98.7	1.3				$0.013 \times 0.461 \times 1,200.0$	7.2
8	64.7	34.0				$0.34 \times 0.461 \times 1,200.0$	188.0
50	16.3	48.4				$0.484 \times 0.461 \times 1,200.0$	267.6
200	8.4	7.9				$0.079 \times 0.461 \times 1,200.0$	43.7
Fondo	0.0	8.4				$0.084 \times 0.461 \times 1,200.0$	46.4
							553.0
Relleno de Agregado: Mineral							
			1,200.0	$100 - \frac{4.0 \times 1.0}{100}$	0.96	$0.010 \times 1,200.0$	11.5
C. A. P.							
			1,200.0		4.00	$0.040 \times 1,200.0$	48.0
PESO x PROBETA= 1200 gr					100.0		1,200.0

Fuente: Propia.

c) Para 4.5% de CA.

Tabla 13: Separación de agregados por retenido para 4.5% de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta % de Asfalto: 4.50 %

Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.5 \times 10.0}{100}$	9.6		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.096 \times 1,200.0$	7.2
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.096 \times 1,200.0$	107.4
4	0.0	0.0				$0 \times 0.096 \times 1,200.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.096 \times 1,200.0$	0.0
							114.6

Agregado Tipo: 5ta

1"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.5 \times 41.0}{100}$	39.2		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.392 \times 1,200.0$	195.9
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.392 \times 1,200.0$	261.2
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.392 \times 1,200.0$	12.3
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.392 \times 1,200.0$	0.4
							469.9

Agregado Tipo: 6ta

1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{4.5 \times 48.0}{100}$	45.8		
4	98.7	1.3				$0.013 \times 0.458 \times 1,200.0$	7.2
8	64.7	34.0				$0.34 \times 0.458 \times 1,200.0$	187.0
50	16.3	48.4				$0.484 \times 0.458 \times 1,200.0$	266.2
200	8.4	7.9				$0.079 \times 0.458 \times 1,200.0$	43.5
Fondo	0.0	8.4				$0.084 \times 0.458 \times 1,200.0$	46.2
							550.1

Relleno de Agregado: Mineral

			1,200.0	$100 - \frac{4.5 \times 1.0}{100}$	0.96	$0.010 \times 1,200.0$	11.5
--	--	--	---------	------------------------------------	------	------------------------	------

C. A. P.

			1,200.0		4.50	$0.045 \times 1,200.0$	54.0
PESO x PROBETA= 1200 gr							
				100.0			1,200.0

Fuente: Propia.

d) Para 5% de CA.

Tabla 14: Separación de agregados por retenido para 5% de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta			% de Asfalto: 5.00 %				
Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.0 \times 10.0}{100}$	9.5		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.095 \times 1,200.0$	7.2
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.095 \times 1,200.0$	106.8
4	0.0	0.0				$0 \times 0.095 \times 1,200.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.095 \times 1,200.0$	0.0
							114.0
Agregado Tipo: 5ta							
1"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.0 \times 41.0}{100}$	39.0		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.390 \times 1,200.0$	194.9
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.390 \times 1,200.0$	259.9
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.390 \times 1,200.0$	12.2
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.390 \times 1,200.0$	0.4
							467.4
Agregado Tipo: 6ta							
1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.0 \times 48.0}{100}$	45.6		
4	98.7	1.3				$0.013 \times 0.456 \times 1,200.0$	7.1
8	64.7	34.0				$0.34 \times 0.456 \times 1,200.0$	186.0
50	16.3	48.4				$0.484 \times 0.456 \times 1,200.0$	264.8
200	8.4	7.9				$0.079 \times 0.456 \times 1,200.0$	43.2
Fondo	0.0	8.4				$0.084 \times 0.456 \times 1,200.0$	46.0
							547.2
Relleno de Agregado: Mineral							
			1,200.0	$100 - \frac{5.0 \times 1.0}{100}$	0.95	$0.010 \times 1,200.0$	11.4
C. A. P.							
			1,200.0		5.00	$0.050 \times 1,200.0$	60.0
PESO x PROBETA= 1200 gr					100.0		1,200.0

Fuente: Propia.

e) Para 5.5% de CA.

Tabla 15: Separación de agregados por retenido para 5% de Asfalto

Agregado Tipo: 4ta				% de Asfalto: 5.50 %			
Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.5 \times 10.0}{100}$	9.5		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.095 \times 1,200.0$	7.1
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.095 \times 1,200.0$	106.2
4	0.0	0.0				$0 \times 0.095 \times 1,200.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.095 \times 1,200.0$	0.0
							113.4
Agregado Tipo: 5ta							
1"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.5 \times 41.0}{100}$	38.7		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.387 \times 1,200.0$	193.9
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.387 \times 1,200.0$	258.5
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.387 \times 1,200.0$	12.1
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.387 \times 1,200.0$	0.4
							464.9
Agregado Tipo: 6ta							
1/2"	100.0		1,200.0	$100 - \frac{5.5 \times 48.0}{100}$	45.4		
4	98.7	1.3				$0.013 \times 0.454 \times 1,200.0$	7.1
8	64.7	34.0				$0.34 \times 0.454 \times 1,200.0$	185.1
50	16.3	48.4				$0.484 \times 0.454 \times 1,200.0$	263.5
200	8.4	7.9				$0.079 \times 0.454 \times 1,200.0$	43.0
Fondo	0.0	8.4				$0.084 \times 0.454 \times 1,200.0$	45.7
							544.3
Relleno de Agregado: Mineral							
			1,200.0	$100 - \frac{5.5 \times 1.0}{100}$	0.95	$0.009 \times 1,200.0$	11.3
C. A. P.							
			1,200.0		5.50	$0.055 \times 1,200.0$	66.0
PESO x PROBETA= 1200 gr					100.0		1,200.0

Fuente: Propia.

Para cada porcentaje de líquido asfáltico se realizaron 3 probetas, teniendo un total de 15 especímenes para cada tipo de mezcla asfáltica.

Una vez separados los materiales, se colocan al horno hasta que los mismos alcancen la temperatura de mezclado requerida para cada tipo de cemento asfáltico. Luego se procede a mezclar, colocar en los moldes y compactar, de acuerdo a lo indicado en la Sección 6.2.6.8. del Manual de Carreteras del Paraguay.

Ilustración 31: Proceso de Mezclado – Proceso de compactación.



Fuente: Propia

Ilustración 30: Probetas Marshall.



Fuente: Propia.

2- Determinación de la gravedad específica de la mezcla.

Una vez elaboradas las probetas y se enfrían a temperatura ambiente se procede a la obtención de las densidades y vacíos, de acuerdo a lo especificado en la sección 6.2.6.6 del Manual de Carreteras del Paraguay.

En la siguiente ilustración se puede observar el proceso para determinar las densidades.

Ilustración 32: a) Peso Seco – b) Peso en agua.



Fuente: Propia

3- Prueba de Estabilidad y Flujo.

Es uno de los métodos para medir las propiedades mecánicas de la mezcla, donde ensayo de estabilidad mide la resistencia a la deformación de la mezcla y la fluencia mide la deformación bajo la carga aplicada a la mezcla.

Primeramente, se sumergen las probetas a baño maría a 60°C durante 30 a 40 min.

Ilustración 34: Probetas en agua a 60°C.



Fuente: Propia

Ilustración 33: Instrumento para determinar la estabilidad y fluencia.



Fuente: Propia.

Luego se extrae del baño y se seca cuidadosamente, para luego colocarlo sobre el aparato de carga, donde se aplica una carga a una deformación constante de 51mm por minuto, hasta que ocurra la falla o rotura de probeta, donde se registran los valores de estabilidad (Carga) y flujo (Deformación) Marshall.

4- Análisis de densidad y vacíos.

Concluidos los ensayos anteriores se determina la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, haciendo uso de la Gravedad específica efectiva total de los agregados, Gravedad específica de la mezcla compactada, Gravedad específica del asfalto y gravedad teórica máxima de la mezcla se determina:

- Porcentaje de Vacíos (Va)
- Porcentaje de Vacíos llenados con Asfalto (VFA)
- Porcentaje de Vacíos en el agregado Mineral (VMA)

Posteriormente se realizan las gráficas de los resultados del ensayo Marshall, se determina cuál de las probetas cumple con los criterios de desempeño y se obtiene el valor del porcentaje de asfalto óptimo para cada mezcla.

4.4.4. Wheel Tracking Test.

El ensayo de Rueda cargada o WTT es uno de los ensayos utilizados para el estudio y caracterización de las deformaciones permanentes en laboratorio. La estructura del ensayo está compuesta básicamente de una rueda neumática que aplica una carga sobre la mezcla asfáltica a la vez que circula sobre ésta.

Para este trabajo de investigación se realizaron dos pares de muestras de (300x300x50 mm) utilizando el cemento asfáltico normal 50/70 denominadas N1 y N2 y el cemento asfáltico modificado tipo 1 denominadas M1 y M2, donde se evaluó el desempeño de cada probeta a una temperatura de 60°C para un 4% de vacíos.

Para el moldeo y compactación de las probetas se utilizó el compactador tipo placa de acuerdo a la norma UNE 12697-33 (2006).

Se obtuvieron las densidades de cada probeta las realizadas con asfalto normal (N1 y N2) y las realizadas con asfalto modificado (M1 y M2), luego se procedió a colocar cada una de las probetas en la máquina de WTT, y por medio del software ECO+ Main Test (EN 12697-22) se pudieron obtener los resultados de la pendiente media

de deformación y la profundidad media de la huella de cada probeta. Para la realización de este ensayo utilizamos como guía la Sección 6.2.6.10 del Manual de Carreteras del Paraguay.

En la siguiente tabla se observan los parámetros de evaluación para este ensayo:

Ilustración 35: Parámetros de Evaluación del WTT

- EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO "Wheel Tracking Test" (Norma ENE-EN 12697-22 – Procedimiento B)				
Pendiente Media de Deformación (WTS AJRE) [mm/1000 ciclos de carga] en el intervalo de 5000 a 10000 ciclos y Profundidad Media de la Huella (PRD) [%]				
Tipo de capa	Clasificación por tránsito			
	T1	T2	T3	T4
Rodamiento	WTS aire ≤ 0,08 PRD ≤ 5%	WTS aire ≤ 0,10 PRD ≤ 8%	WTS aire ≤ 0,12 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 10%
Base	WTS aire ≤ 0,10 PRD ≤ 8%	WTS aire ≤ 0,12 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 10%	WTS aire ≤ 0,15 PRD ≤ 12%

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay.

4.4.4.1. Preparación y compactación de las mezclas asfálticas en caliente por medio del compactador tipo placa.

Primeramente, se realiza el proceso de preparación de los materiales, que incluye pesar y separar los agregados por retenido mediante la proporción calculada por medio del volumen del molde y la densidad Marshall.

Ilustración 36: Proceso de pesaje de cada material.



Fuente: Propia.

Para la dosificación se siguió el mismo procedimiento utilizado en el diseño por el método Marshall, las cantidades se detallan en la siguiente tabla para cada tipo de cemento asfáltico:

a) Para CA normal 50/70:

Tabla 16: Separación por retenido para asfalto normal 50/70.

Agregado Tipo: 4ta				% de Asfalto: 4.50 %			
Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.5 \times 10.0}{100}$	9.6		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.096 \times 12,000.0$	72.2
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.096 \times 12,000.0$	1,073.7
4	0.0	0.0				$0 \times 0.096 \times 12,000.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.096 \times 12,000.0$	0.1
							1,146.0
Agregado Tipo: 5ta							
1"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.5 \times 41.0}{100}$	39.2		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.392 \times 12,000.0$	1,959.3
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.392 \times 12,000.0$	2,612.4
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.392 \times 12,000.0$	122.6
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.392 \times 12,000.0$	4.2
							4,698.6
Agregado Tipo: 6ta							
1/2"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.5 \times 48.0}{100}$	45.8		
4	93.5	6.5				$0.065 \times 0.458 \times 12,000.0$	357.6
8	64.6	28.9				$0.289 \times 0.458 \times 12,000.0$	1,589.7
50	16.2	48.4				$0.484 \times 0.458 \times 12,000.0$	2,662.4
200	8.3	7.9				$0.079 \times 0.458 \times 12,000.0$	434.6
Fondo	0.0	8.3				$0.083 \times 0.458 \times 12,000.0$	456.6
							5,500.8
Relleno de Agregado: Mineral							
			12,000.0	$100 - \frac{4.5 \times 1.0}{100}$	0.96	$0.010 \times 12,000.0$	114.6
C. A. P.							
			12,000.0		4.50	$0.045 \times 12,000.0$	540.0
PESO x PROBETA= 11.412 gr					100.0		12,000.0

Fuente: Propia.

b) Para CA modificado tipo 1:

Tabla 17: Separación por retenido para asfalto modificado tipo 1.

Agregado Tipo: 4ta				% de Asfalto: 4.60 %			
Tamiz	% que Pasa	% Rete. Acumul.	Peso Total a Usar	% Arido a Usar	% del Arido	Formula a Desarrollar	Peso de Material por Tamiz
1 1/2"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.6 \times 10.0}{100}$	9.5		
1"	93.7	6.3				$0.063 \times 0.095 \times 12,000.0$	72.1
1/2"	0.01	93.7				$0.937 \times 0.095 \times 12,000.0$	1,072.6
4	0.0	0.0				$0 \times 0.095 \times 12,000.0$	0.0
Fondo	0.0	0.0				$1E-04 \times 0.095 \times 12,000.0$	0.1
							1,144.8
Agregado Tipo: 5ta							
1"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.6 \times 41.0}{100}$	39.1		
1/2"	58.3	41.7				$0.417 \times 0.391 \times 12,000.0$	1,957.3
4	2.7	55.6				$0.556 \times 0.391 \times 12,000.0$	2,609.7
8	0.1	2.6				$0.026 \times 0.391 \times 12,000.0$	122.5
Fondo	0.0	0.1				$9E-04 \times 0.391 \times 12,000.0$	4.2
							4,693.7
Agregado Tipo: 6ta							
1/2"	100.0		12,000.0	$100 - \frac{4.6 \times 48.0}{100}$	45.8		
4	93.5	6.5				$0.065 \times 0.458 \times 12,000.0$	357.2
8	64.6	28.9				$0.289 \times 0.458 \times 12,000.0$	1,588.1
50	16.2	48.4				$0.484 \times 0.458 \times 12,000.0$	2,659.6
200	8.3	7.9				$0.079 \times 0.458 \times 12,000.0$	434.1
Fondo	0.0	8.3				$0.083 \times 0.458 \times 12,000.0$	456.1
							5,495.0
Relleno de Agregado: Mineral							
			12,000.0	$100 - \frac{4.6 \times 1.0}{100}$	0.95	$0.010 \times 12,000.0$	114.5
C. A. P.							
			12,000.0		4.60	$0.046 \times 12,000.0$	552.0
PESO x PROBETA= 11.380 gr					100.0		12,000.0

Fuente: Propia.

Ilustración 37: Separación de los materiales



Fuente: Propia.

Una vez culminado el proceso de separación de los materiales se colocan los mismos al horno a la temperatura de mezclado requerida para cada mezcla asfáltica.

Seguidamente, con los materiales previamente calentados en el horno, los colocamos en una mezcladora que también fue calentada a la temperatura de mezclado correspondiente, se agrega el cemento asfáltico y se procede a mezclar hasta obtener una mezcla uniforme, atendiendo que siempre se encuentre dentro del rango de temperatura requerida, a continuación, se observan las imágenes del proceso:

Ilustración 38: Proceso de mezclado.



Fuente: Propia.

Culminado el proceso de mezclado, preparamos la mezcla y el molde a utilizar llevándolos al horno a la temperatura de compactación, durante un periodo de 2 horas aproximadamente. A continuación, se realiza el engrasado del molde y se coloca la mezcla con ayuda de una espátula, distribuyéndola de esta manera hasta rellenar completamente el molde.

Ilustración 39: a) Mezcla colocada en el compactador. - b) Mezcla compactada.



Fuente: Propia.

Se coloca el molde en el compactador tipo placa y lo configuramos inicialmente en 5 pasadas para una previa compactación que sirve para retirar el material excedente, se repite el proceso configurando el equipo para realizar las 45 pasadas restantes, completando en total las 50 pasadas. Retiramos el molde del compactador, y dejamos enfriar la mezcla aproximadamente por 24 horas.

4.4.4.2. Densidad específica de la mezcla compactada.

Una vez enfriada la probeta se realiza el desmolde y pesamos la probeta de modo a obtener la masa seca de la probeta (A), la masa saturada superficie seca (B) y la masa sumergida de la probeta (C), para así obtener la densidad específica (G) mediante la siguiente formula:

$$G = \frac{A}{B - C}$$

En la siguiente ilustración se observa el procedimiento para la obtención de los datos:

Ilustración 40: a) Masa sumergida de la probeta - b) Secado para obtención de masa SSS.



Fuente: Propia

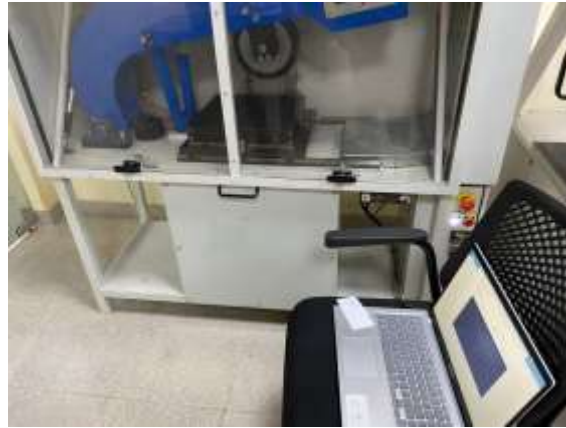
4.4.4.3. Ensayo de rueda cargada (WTT).

Cuando las probetas se encuentren a temperatura ambiente, se prepara el equipo para el ensayo de rueda cargada, se inicia el software y se ingresan los datos como la densidad, espesor de la probeta, el tipo de procedimiento en este caso el procedimiento B de 10.000 ciclos y los datos correspondientes a la norma utilizada (EN 12697 – 22 2020). Se coloca la probeta en el molde del equipo y se cierra la cámara termostatazada, que permite mantener la temperatura estable, de 60°C, durante la realización del ensayo.

Se da inicio al ensayo presionando el boto de “Reset” ubicado en el panel de control del equipo que da inicio al proceso de acondicionamiento de temperatura que dura aproximadamente 4 horas, hasta llegar a la temperatura indicada para la ejecución del ensayo, posteriormente se aplica la carga sobre la mezcla asfáltica

a medida que la rueda circula sobre esta, hasta completar los 10.000 ciclos.

Ilustración 41: Probeta colocada en el Equipo de WTT.



Fuente: Propia.

Durante el proceso se miden las deformaciones permanentes producidas en la mezcla asfáltica, este ensayo tiene como finalidad definir la resistencia al ahuellamiento, y en este trabajo de investigación se plantea comparar dos tipos de mezclas realizadas con asfalto normal 50/70 y asfalto modificado tipo 1 ante la verificación al ahuellamiento. Determinando de esta manera cuál de ellas registra un mejor comportamiento capaz de resistir este tipo de fallas.

Ilustración 42: Probeta Ensayada con asfalto normal 50/70 (N1) - Probeta ensayada con asfalto modificado tipo 1 (M1).



Fuente: Propia.

CAPITULO 5 RESULTADOS Y ANALISIS.

En este capítulo se exponen y analizan los resultados experimentales mencionados en el capítulo anterior.

Se presentan los resultados de la investigación principal, correspondiente al análisis comparativo de las mezclas asfálticas de cemento asfáltico convencional y cemento

asfáltico modificado ante la deformación permanente, por lo cual se incluyen los resultados obtenidos del Marshall y el Wheel Tracking Test.

El diseño de mezclas utilizado para este trabajo de investigación, corresponde a la carpeta asfáltica utilizada en el tramo (Km183 - Km 219) de la obra “Duplicación de la ruta PY02”

Ilustración 43: Estructura de un pavimento flexible.



Fuente: Propia.

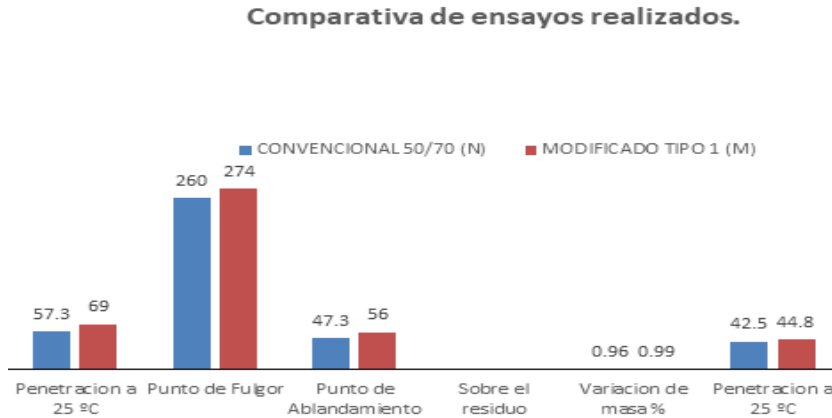
En la siguiente ilustración se puede observar la estructura típica de un pavimento flexible.

Se elaboraron dos tipos de mezclas, una con cemento asfáltico convencional, que fue la utilizada en obra, y otra con cemento asfáltico modificado, manteniendo para ambas mezclas una misma granulometría.

A continuación, se exponen el análisis y comparación de los resultados obtenidos:

5.1. Resultados correspondientes a los cementos asfálticos.

Ilustración 44: Análisis comparativo de los ensayos realizados.



Fuente: Propia.

Tabla 18: Resultados comparativos entre el asfalto normal y el asfalto modificado.

ENSAYO	UNIDAD	NORMA	ANALISIS
Penetración a 25 °C	mm	IRAM 6576	M mayor en 20.4%
Punto de Fulgor	°C	IRAM 6555	M mayor en 5.4%
Punto de Ablandamiento	°C	IRAM115	M mayor en 18.4%
Viscosidad Brookfield 135 °C	cP	IRAM 6836	-
Viscosidad Brookfield 150 °C	cP	IRAM 6837	-
Viscosidad Brookfield 177 °C	cP	IRAM 6838	-
Ductilidad a 25°C	cm	IRAM 6579	-
Recuperación elástica torsional 25 °C	%	IRAM 6830	-
Sobre el residuo			-
Variación de masa %	%	IRAM 6582	M mayor en 3%
Penetración a 25 °C	mm	IRAM 6576	M mayor en 5.4%
Punto de ablandamiento	°C	IRAM115	M mayor en 18.4%
Ductilidad a 25°C	cm	IRAM 6579	-

Fuente: Propia.

5.2. Resultados del diseño de ambas mezclas por el método Marshall.

5.2.1. Asfalto convencional 50/70.

Tabla 19: a) Planilla de dosaje del ensayo Marshall - asfalto convencional.

PROB. N°	% ASF. (EN PESO) <i>a</i> %	PESO SECO <i>b</i> gr.	PESO EN EL AGUA <i>c</i> gr.	PESO SAT. SUP. SECA <i>d</i> gr.	VOLUM. <i>e = d - c</i> cm ³	Absor. <i>A = (d-b) / e</i> %	DENS. MARSHALL <i>f = b / e</i> gr./cm ³	DENS. TEÓRICA (RICE) <i>g</i> gr./cm ³	VACÍO MEZCL. ASF. <i>h = (g - f) / g</i> %	VOLUM. ASF. <i>i = a * b</i> cm ³
1	3.50	1,191.1	726.1	1,205.8	479.7	3.1%	2.483	2.691	7.73	41.7
2	3.50	1,186.1	722.0	1,198.6	476.6	2.6%	2.489	2.691	7.52	41.5
3	3.50	1,168.2	709.0	1,178.4	469.4	2.2%	2.489	2.691	7.52	40.9
						2.6%	2.487		7.6	
4	4.00	1,209.4	736.1	1,218.0	481.9	1.8%	2.510	2.668	5.94	48.4
5	4.00	1,203.1	736.6	1,214.0	477.4	2.3%	2.520	2.668	5.54	48.1
6	4.00	1,207.1	735.6	1,214.8	479.2	1.6%	2.519	2.668	5.59	48.3
						1.9%	2.516		5.7	
7	4.50	1,214.0	741.6	1,218.0	476.4	0.8%	2.548	2.649	3.80	54.6
8	4.50	1,215.0	742.3	1,220.3	478.0	1.1%	2.542	2.649	4.05	54.7
9	4.50	1,217.0	743.0	1,221.3	478.3	0.9%	2.544	2.649	3.95	54.8
						0.9%	2.545		3.9	
10	5.00	1,230.8	745.3	1,233.1	487.8	0.5%	2.523	2.610	3.33	61.5
11	5.00	1,225.6	744.1	1,228.3	484.2	0.6%	2.531	2.610	3.02	61.3
12	5.00	1,232.2	747.8	1,235.0	487.2	0.6%	2.529	2.610	3.10	61.6
						0.5%	2.528		3.1	
13	5.50	1,238.3	747.0	1,239.5	492.5	0.2%	2.514	2.580	2.55	68.1
14	5.50	1,236.0	746.1	1,237.6	491.5	0.3%	2.515	2.580	2.53	68.0
15	5.50	1,237.0	747.0	1,238.1	491.1	0.2%	2.519	2.580	2.37	68.0
						0.3%	2.516		2.5	

Fuente: Propia.

Tabla 20: b) Planilla de dosaje del ensayo Marshall - asfalto convencional.

% ASF. (EN VOLUM.) $j = l / e$ %	% VACIO AGREG. MINERAL $k = h + j$ %	RELAC. BET. / VAC. $l = j / k$	ALT. PROB. m mm.	LECT. KN o	FACTOR CORR. q	ESTAB. $q = o * p$ kg.	FLUENC. s mm.	RELAC. ESTAB. / FLUENC. r / s
8.7	16.4	52.9	63.3	9.90	1.005	1,014	1.6	6,338
8.7	16.2	53.7	61.7	9.55	1.047	1,020	1.9	5,367
8.7	16.2	53.7	62.7	9.85	1.020	1,025	1.8	5,692
	16.3	53.4				1,019	1.8	5,799
10.0	16.0	62.8	62.4	11.05	1.027	1,157	1.9	6,092
10.1	15.6	64.5	63.6	10.60	0.996	1,077	2.3	4,683
10.1	15.7	64.3	61.8	10.81	1.046	1,153	2.5	4,613
	15.8	63.9				1,129	2.2	5,129
11.5	15.3	75.1	63.0	11.30	1.013	1,167	2.9	4,024
11.4	15.5	73.9	62.4	11.55	1.028	1,211	3.2	3,784
11.4	15.4	74.4	63.2	12.00	1.007	1,232	2.9	4,250
	15.4	74.4				1,203	3.0	4,019
12.6	15.9	79.1	63.3	12.31	1.003	1,260	3.6	3,499
12.7	15.7	80.7	63.9	11.80	0.990	1,191	3.3	3,608
12.6	15.7	80.3	63.1	12.60	1.009	1,296	3.5	3,704
	15.8	80.1				1,249	3.5	3,604
13.8	16.4	84.5	63.1	10.85	1.009	1,117	3.6	3,102
13.8	16.4	84.5	63.0	11.30	1.012	1,166	3.8	3,069
13.9	16.2	85.4	62.8	10.50	1.017	1,089	3.5	3,113
	16.3	84.8				1,124	3.6	3,095

Fuente: Propia.

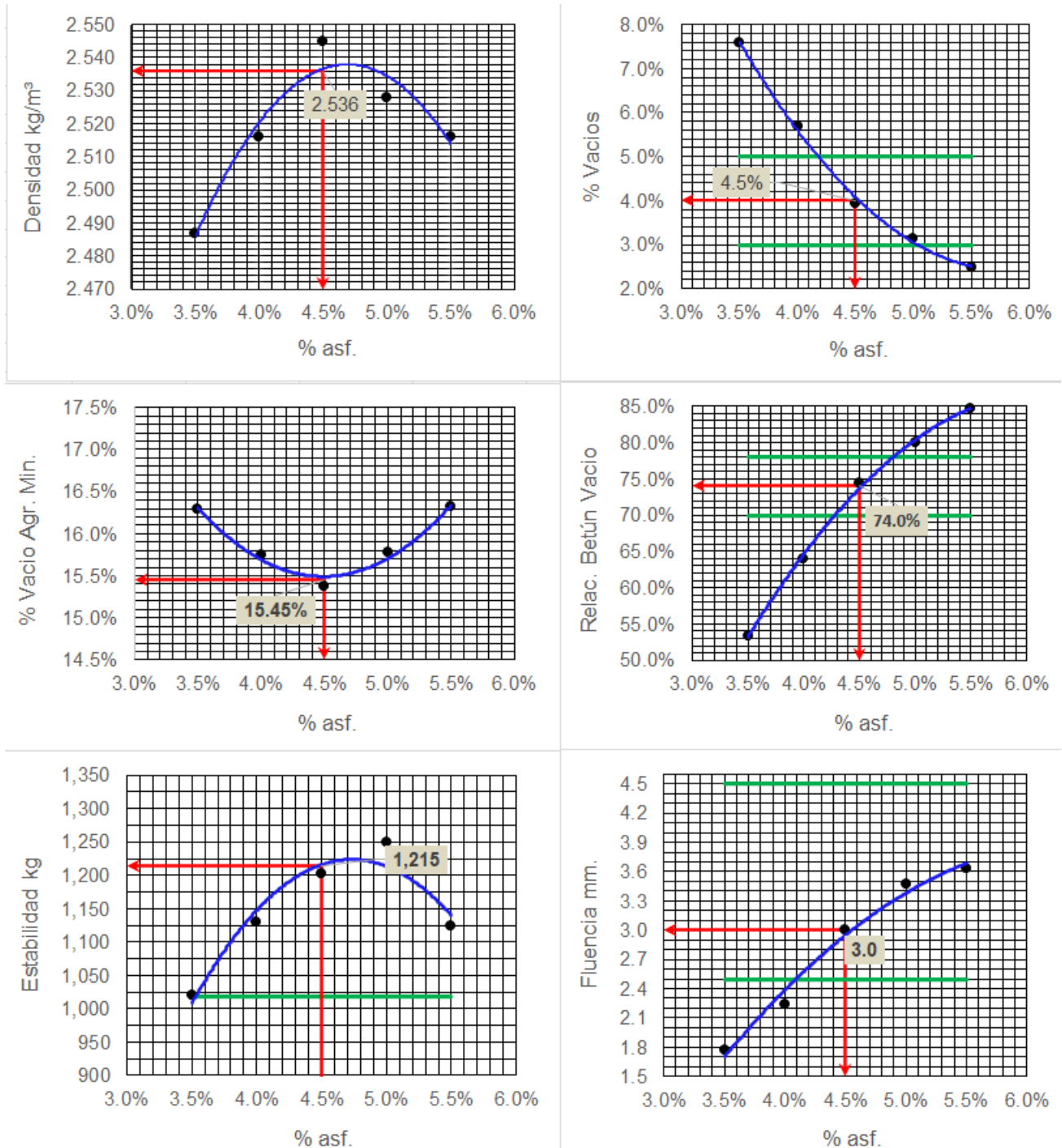
Tabla 21: Planilla de valores promedios para los distintos porcentajes de asfalto.

4ta= 10% - 5ta= 41% - 6ta - 48% - Cal= 1%								
Muestra Nº	% Asf.	Densidad kg/m ³	% vacíos	%Vacio Agreg. Mineral	Relación Betún- vacíos	Estabilidad kg.	Fluencia mm.	Estab. fluencia
1	3.5%	2.487	7.6%	16.3%	53.4%	1,019	1.8	5,771
2	4.0%	2.516	5.7%	15.8%	63.9%	1,129	2.2	5,056
3	4.5%	2.545	3.9%	15.4%	74.4%	1,203	3.0	4,011
4	5.0%	2.528	3.1%	15.8%	80.1%	1,249	3.5	3,603
5	5.5%	2.516	2.5%	16.3%	84.8%	1,124	3.6	3,094

Fuente: Propia.

En base a los resultados indicados en la tabla 23, se realizan los siguientes gráficos:

Ilustración 45: Graficas Marshall para mezcla con asfalto Convencional 50/70.



Fuente: Propia.

De acuerdo a los gráficos, se procede a obtener el porcentaje de asfalto

óptimo, de acuerdo a lo especificado en el Manual de Carreteras del Paraguay.

A partir del valor del porcentaje de asfalto óptimo obtenido se procede a la verificación del diseño

Tabla 22: Comprobación de Diseño - Asfalto Convencional 50/70.

PROB. N°	% ASF. (EN PESO) a	DENS. MARSHALL f= b / e	DENS. TEÓRICA (RICE) g	VACÍO MEZCL. ASF. h= (g - f) / g	% VACÍO AGREG. MINERAL k= h + j	RELAC. BET./ VAC. l= j / k	ESTAB. q= o * p	FLUENC. s	RELAC. ESTAB. / FLUENC. r / s
	%	gr./cm3	gr./cm3	%	%		kg.	mm.	
1	4.50	2.534	2.648	4.29	15.7	72.7	1,228	2.9	4,235
2	4.50	2.529	2.648	4.51	15.9	71.6	1,193	3.3	3,614
3	4.50	2.531	2.648	4.40	15.8	72.1	1,245	3.1	4,015
		2.532		4.4	15.8	72.1	1,222	3.1	3,955
				3 - 5	14.0%	65 - 75	> 1000	2,5-4,5	

Fuente: Propia.

Tabla 23: Resumen de valores promedios para el porcentaje óptimo de asfalto.

Muestra N°	% Asf.	Densidad kg/m3	% vacíos	%Vacio Agreg. Mineral	Relación Betún-vacíos	Estabilidad kg.	Fluencia mm.	Estab. fluencia
Espefic.			3 - 5	Min. 14%	65 - 75	> 1000	2,5 - 4,5	
Óptimo	4.50%	2.532	4.4%	15.8%	72.1%	1,222	3.1	3.955

Fuente: Propia.

En base a la comprobación realizada, se puede observar que con un 4.5% de Asfalto convencional se obtiene un promedio de vacío de la mezcla de 4.4% por lo cual cumple con las especificaciones indicadas en el Manual de Carreteras del Paraguay.

También se puede observar que el porcentaje de VAM, relación B/V, estabilidad y fluencia están entre los rangos permitidos, por lo cual se puede decir que la mezcla asfáltica realizada con cemento asfáltico convencional 50/70 cumple con los parámetros de diseño establecidos.

Posteriormente se procede a la verificación de la densidad de los

agregados y de la mezcla, se verifican los valores de G_{sa} , G_{se} y G_{sb} de modo a que se cumpla la siguiente condición $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$.

Si no se cumple la relación se deberán revisar los resultados de los ensayos de densidad relativa del material pétreo (G_{sb} y G_{sa}) y de densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}).

A continuación, se observa el proceso para la determinación de estas variables.

Tabla 24: Determinación de G_{sa} , G_{se} y G_{sb} .

N de muestra	Material	Dosificación		Grav específica aparente del agregado (g/cm^3)	Grav específica aparente de la mezcla de agregados (g/cm^3)	Grav específica bulk del agregado (g/cm^3)	Grav específica bulk de la mezcla de agregados (g/cm^3)
		de los áridos (%)	de la mezcla (%)				
1	4ta	10	10	2.858	2.899	2.816	2.806
2	5ta	41	41	2.866		2.791	
3	6ta	48	48	2.949		2.828	
4	Cal	1	1	2.284		2.284	
Dm =		100					

Fuente: Propia.

Y se calculan los valores de porcentaje de asfalto absorbido (P_{ba}) y el porcentaje de asfalto efectivo (P_{be})

Tabla 25: Determinación del asfalto efectivo y absorbido

% ASF. (EN PESO) a %	GRAV. TEÓRICA (RICE) b gr/cm^3	DENS. CAP c gr/cm^3	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE DEL AGREGADO (G_{sa}) g gr/cm^3	GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO (G_{se}) $d=(100-a)/(100/b-a/c)$ gr/cm^3	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO (G_{sb}) g gr/cm^3	
4.5	2.648	1.008	2.899	2.867	2.806	
			Gmm	Gsa >	Gse >	Gsb
			2.648	2.899	2.867	2.806
			Pba:	0.76 %		
			Pbe:	3.77 %		

Fuente: Propia.

Se puede observar que se cumple la condición de: $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$ y que utilizando el cemento asfáltico convencional 50/70 se obtiene un valor del

contenido de asfalto efectivo igual a 3.77% y de asfalto absorbido igual a 0.76%.

5.2.2. Asfalto modificado tipo 1.

Tabla 26: a) Planilla de dosaje del ensayo Marshall - asfalto modificado tipo 1.

PROB. N°	% ASF. (EN PESO) <i>a</i> %	PESO SECO <i>b</i> gr.	PESO EN EL AGUA <i>c</i> gr.	PESO SAT. SUP. SECA <i>d</i> gr.	VOLUM. <i>e</i> = <i>d</i> - <i>c</i> cm ³	Absor. <i>A</i> = (<i>d</i> - <i>b</i>) / <i>e</i> %	DENS. MARSHALL <i>f</i> = <i>b</i> / <i>e</i> gr./cm ³	DENS. TEÓRICA (RICE) <i>g</i> gr./cm ³	VACIO MEZCL. ASF. <i>h</i> = (<i>g</i> - <i>f</i>) / <i>g</i> %	VOLUM. ASF. <i>i</i> = <i>a</i> * <i>b</i> cm ³
Mezcla N° 1 - Dosaje 4ta= 10% - 5ta= 41% - 6ta= 48% - Filler= 1%										
1	3.50	1,200.7	732.5	1,214.1	481.6	2.8%	2.493	2.725	8.51	42.0
2	3.50	1,195.6	729.6	1,208.2	478.6	2.6%	2.498	2.725	8.33	41.8
3	3.50	1,204.0	733.1	1,215.4	482.3	2.4%	2.496	2.725	8.39	42.1
						2.6%	2.496		8.4	
4	4.00	1,209.0	738.9	1,219.9	481.0	2.3%	2.514	2.685	6.39	48.4
5	4.00	1,210.4	740.1	1,220.4	480.3	2.1%	2.520	2.685	6.14	48.4
6	4.00	1,207.5	737.7	1,217.0	479.3	2.0%	2.519	2.685	6.17	48.3
						2.1%	2.518		6.2	
7	4.50	1,216.9	743.0	1,224.0	481.0	1.5%	2.530	2.644	4.31	54.8
8	4.50	1,219.6	747.2	1,228.0	480.8	1.7%	2.537	2.644	4.06	54.9
9	4.50	1,214.9	744.1	1,223.2	479.1	1.7%	2.536	2.644	4.09	54.7
						1.7%	2.534		4.2	
10	5.00	1,223.5	742.5	1,228.6	486.1	1.0%	2.517	2.601	3.23	61.2
11	5.00	1,223.9	743.6	1,230.1	486.5	1.3%	2.516	2.601	3.28	61.2
12	5.00	1,222.2	742.3	1,228.6	486.3	1.3%	2.513	2.601	3.37	61.1
						1.2%	2.515		3.3	
13	5.50	1,237.8	743.0	1,239.5	496.5	0.3%	2.493	2.560	2.62	68.1
14	5.50	1,234.5	742.6	1,238.0	495.4	0.7%	2.492	2.560	2.66	67.9
15	5.50	1,229.1	736.0	1,230.0	494.0	0.2%	2.488	2.560	2.81	67.6
						0.4%	2.491		2.7	

Fuente: Propia.

Tabla 27: b) Planilla de dosaje del ensayo Marshall - asfalto modificado tipo 1

% ASF. (EN VOLUM.) $j = i / e$ %	% VACÍO AGREG. MINERAL $k = h + j$ %	RELAC. BET. / VAC. $l = j / k$	ALT. PROB. m mm.	LECT. KN o	FACTOR CORR. q	ESTAB. $p = o * q$ kg.	FLUENC. s mm.	RELAC. ESTAB. / FLUENC. r / s
8.7	17.2	50.6	61.6	12.00	1.051	1,286	2.6	4,946
8.7	17.1	51.2	62.1	11.30	1.035	1,193	2.3	5,187
8.7	17.1	51.0	62.5	12.50	1.025	1,307	2.0	6,534
	17.1	51.0				1,262	2.3	5,556
10.1	16.4	61.2	62.7	13.30	1.019	1,382	2.9	4,767
10.1	16.2	62.1	62.9	13.50	1.016	1,399	2.7	5,181
10.1	16.2	62.0	62.4	14.90	1.028	1,561	2.6	6,006
	16.3	61.8				1,448	2.7	5,318
11.4	15.7	72.5	63.4	15.40	1.002	1,574	3.1	5,078
11.4	15.5	73.8	63.6	15.90	0.997	1,617	3.0	5,390
11.4	15.5	73.6	63.8	16.30	0.993	1,650	3.3	5,000
	15.6	73.3				1,614	3.1	5,156
12.6	15.8	79.6	63.9	11.10	0.989	1,119	3.7	3,025
12.6	15.9	79.3	64.0	13.40	0.986	1,348	3.4	3,964
12.6	15.9	78.8	64.2	12.40	0.981	1,240	3.5	3,544
	15.9	79.2				1,236	3.5	3,511
13.7	16.3	84.0	63.9	11.50	0.988	1,159	4.3	2,695
13.7	16.4	83.8	63.4	11.10	1.002	1,135	3.9	2,909
13.7	16.5	83.0	63.1	11.30	1.009	1,162	3.7	3,141
	16.4	83.6				1,152	4.0	2,915

Fuente: Propia.

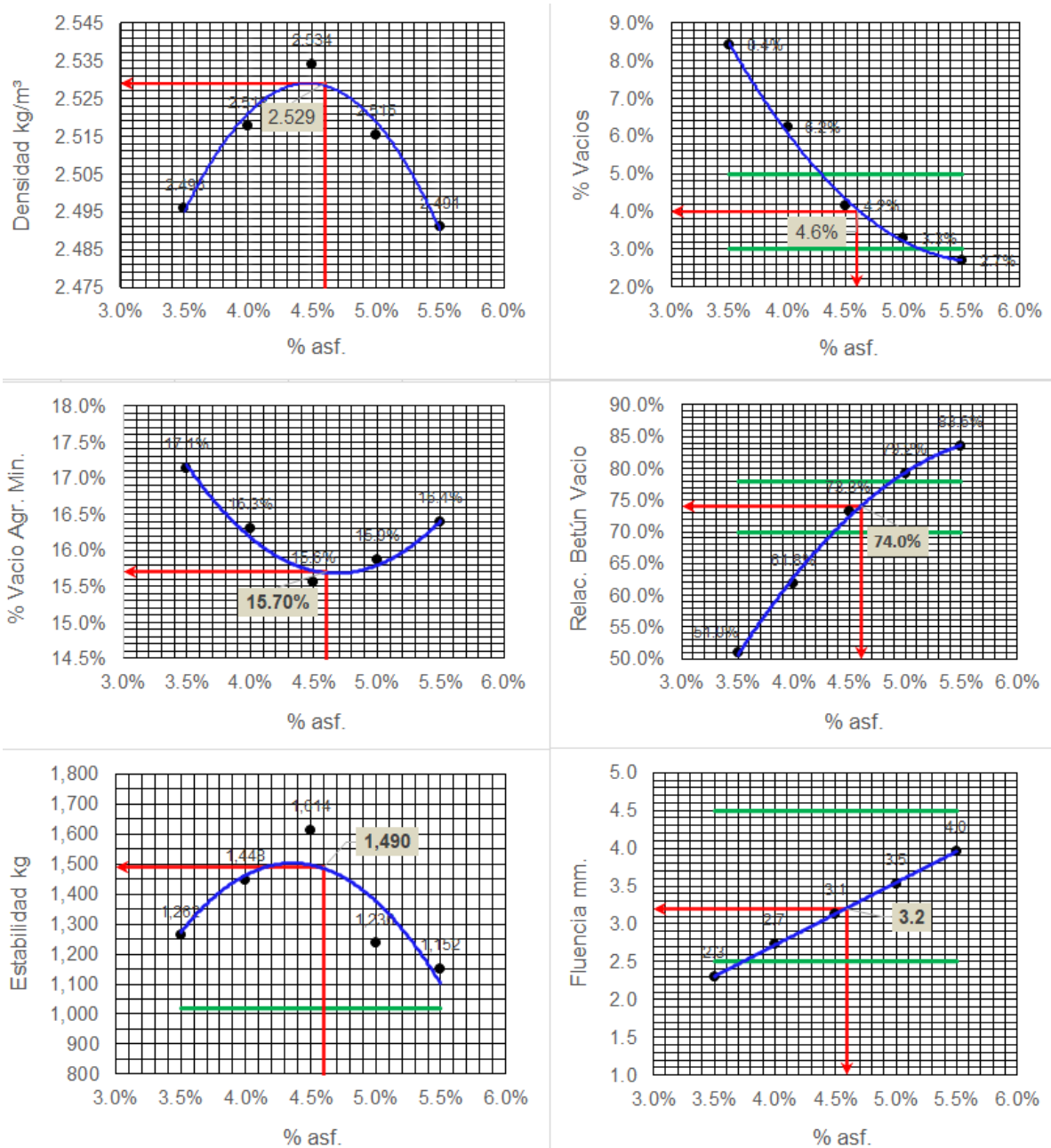
Tabla 28: Planilla de valores promedios para los distintos porcentajes de asfalto.

Muestra Nº	% Asf.	Densidad kg/m ³	% vacíos	%Vacio Agreg. Mineral	Relación Betún- vacíos	Estabilidad kg.	Fluencia mm.	Estab. fluencia
1	3.5%	2.496	8.4%	17.1%	51.0%	1,262	2.3	5,487
2	4.0%	2.518	6.2%	16.3%	61.8%	1,448	2.7	5,296
3	4.5%	2.534	4.2%	15.6%	73.3%	1,614	3.1	5,150
4	5.0%	2.515	3.3%	15.9%	79.2%	1,236	3.5	3,498
5	5.5%	2.491	2.7%	16.4%	83.6%	1,152	4.0	2,904

Fuente: Propia.

En base a los resultados indicados en la tabla anterior, se realizan los siguientes gráficos:

Ilustración 46: Graficas Marshall para mezcla con asfalto modificado tipo 1.



Fuente: Propia.

De acuerdo a los gráficos, se procede a obtener el porcentaje de asfalto optimo, de acuerdo a lo especificado en el Manual de Carreteras del Paraguay.

A partir del valor del porcentaje de asfalto optimo obtenido se procede a la verificación del diseño

Tabla 29: Comprobación de diseño - Asfalto modificado tipo 1.

PROB. N°	% ASF. (EN PESO) a	DENS. MARSHALL f= b / e	DENS. TEÓRICA (RICE) g	VACIO MEZCL. ASF. h= (g - f) / g	% VACIO AGREG. MINERAL k= h + j	RELAC. BET. / VAC. l= j / k	ESTAB. q= o * p	FLUENC. s	RELAC. ESTAB. / FLUENC. r / s
	%	gr./cm3	gr./cm3	%	%		kg.	mm.	
Mezcla N° 2 - Dosaje 4ta= 10% - 5ta= 41% - 6ta= 48% - Filler= 1%									
1	4.60	2.520	2.631	4.20	15.8	73.4	1,495	3.6	4,153
2	4.60	2.522	2.631	4.15	15.7	73.7	1,542	3.3	4,674
3	4.60	2.525	2.631	4.02	15.6	74.3	1,461	4.0	3,651
		2.523		4.1	15.7	73.8	1,499	3.6	4,159
Especificación Técnica:				3 - 5	14.0%	65 - 75	> 1000	2,5-4,5	

Fuente: Propia.

Tabla 30: Resumen de valores promedio para el óptimo de asfalto.

Muestra N°	% Asf.	Densidad kg/m3	% vacíos	%Vacio Agreg. Mineral	Relación Betún-vacíos	Estabilidad kg.	Fluencia mm.	Estab. fluencia
Óptimo	4.60%	2.523	4.1%	15.7%	73.8%	1,499	3.6	4.159
Especif.			3 - 5	Min. 14%	65-75	> 1000	2,5 - 4,5	

Fuente: Propia.

En base a la comprobación realizada, se puede observar que con un 4.6% de Asfalto convencional se obtiene un promedio de vacío de la mezcla de 4.1% por lo cual cumple con las especificaciones indicadas en el Manual de Carreteras del Paraguay.

También se puede observar que el porcentaje de VAM, relación B/V, estabilidad y fluencia están entre los rangos permitidos, por lo cual se puede decir que la mezcla asfáltica realizada con cemento asfáltico modificado tipo 1 cumple con los parámetros de diseño establecidos.

Posteriormente se procede a la verificación de la densidad de los agregados y de la mezcla, se verifican los valores de G_{sa}, G_{se} y G_{sb} de modo a que se cumpla la siguiente condición G_{sa} > G_{se} > G_{sb}.

Si no se cumple la relación se deberán revisar los resultados de los ensayos de densidad relativa del material pétreo (G_{sb} y G_{sa}) y de densidad relativa teórica máxima de la mezcla asfáltica (G_{mm}).

A continuación, se observa el proceso para la determinación de estas variables.

Ilustración 47: Determinación de Gsa, Gse y Gsb.

N de muestra	Material	Dosificación		Grav específica aparente del agregado (g/cm ³)	Grav específica aparente de la mezcla de agregados (g/cm ³)	Grav específica bulk del agregado (g/cm ³)	Grav específica bulk de la mezcla de agregados (g/cm ³)
		de los áridos (%)	de la mezcla (%)				
1	4ta	10	10	2.858	2.899	2.816	2.806
2	5ta	41	41	2.866		2.791	
3	6ta	48	48	2.949		2.828	
4	Cal	1	1	2.284		2.284	
Dm =		100					

Fuente: Propia.

Y se calculan los valores de porcentaje de asfalto absorbido (Pba) y el porcentaje de asfalto efectivo (Pbe).

Ilustración 48: Determinación del porcentaje de asfalto absorbido y asfalto efectivo

% ASF. (EN PESO) a %	GRAV. TEÓRICA (RICE) b gr/cm ³	DENS. CAP c gr/cm ³	GRAVEDAD ESPECÍFICA APARENTE DEL AGREGADO (G _{SA}) g gr/cm ⁴	GRAVEDAD ESPECÍFICA EFECTIVA DEL AGREGADO (G _{SE}) d=(100-a)/(100/b-a/c) gr/cm ³	GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK DEL AGREGADO (G _{SB}) g gr/cm ⁵
4.6	2.631	1.012	2.899	2.85	2.806
		Gmm	Gsa >	Gse >	Gsb
		2.63	2.899	2.85	2.806
		Pba:	0.55 %		
		Pbe:	4.07 %		

Fuente: Propia.

Se puede observar que se cumple la condición de: Gsa > Gse > Gsb y que utilizando el cemento asfáltico modificado tipo 1 se obtiene un valor del contenido de asfalto efectivo igual a 4.07% y de asfalto absorbido igual a 0.55%.

5.3. Análisis comparativo de los resultados.

Seguidamente, se observa la comparación de resultados para los diseños con asfalto modificado y convencional 50/70.

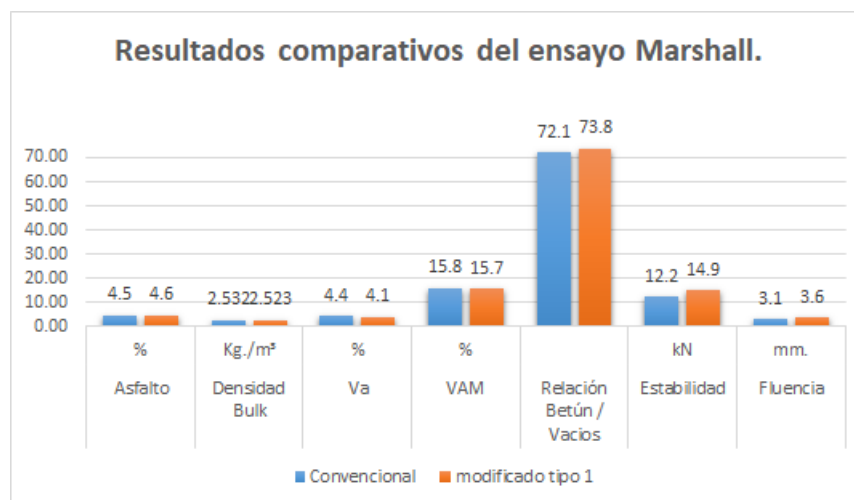
Tabla 31: Resultados de los diseños de mezclas.

Tipo de asfalto		Convencional	Modificado tipo 1	Tolerancia
Asfalto	%	4.5	4.6	
Densidad Bulk	Kg./m ³	2.532	2.523	
Va	%	4.4	4.1	3 a 5
VAM	%	15.8	15.7	> 14
Relación Betún / Vacíos		72.1	73.8	65 - 75
Estabilidad	kN	12.2	14.9	> 10
Fluencia	mm.	3.1	3.6	2.5 - 4.5

Fuente: Propia.

En el siguiente grafico se exponen los resultados comparativos obtenidos en el ensayo Marshall para las mezclas asfálticas realizadas utilizando el cemento asfáltico convencional 50/70 y el modificado tipo 1.

Ilustración 49: Resultados comparativos del ensayo Marshal.



Fuente: Propia.

Se observa que las mezclas con cemento asfáltico modificado tipo 1 requieren de 0.1% más de asfalto que las mezclas realizadas con cemento asfáltico convencional 50/70, entre los porcentajes de vacíos podemos ver que la mezcla con asfalto convencional supera al modificado en un 0.3%, el valor de estabilidad en el diseño con asfalto modificado es mayor que el asfalto convencional debido a la presencia del polímero y con respecto a los valores de fluencia se tiene una

diferencia de 0.5% siendo mayor el de la mezcla con asfalto modificado.

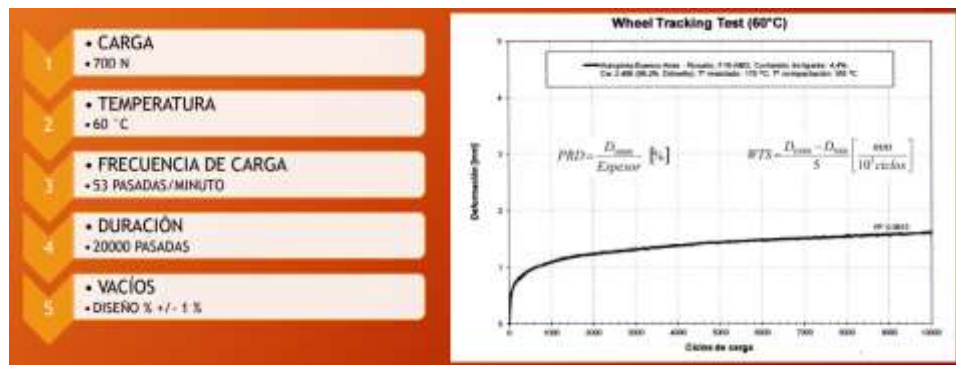
5.3. Resultados del ensayo de rueda cargada (Wheel tracking Test).

Para los ensayos de rueda cargada fueron realizadas 2 probetas por cada tipo de asfalto, denominando (N1 y N2) a las probetas realizadas con asfalto normal 50/70 y (M1 y M2) a las realizadas con asfalto modificado.

Para el cálculo de las masas de cada probeta, se tuvo en cuenta los valores correspondientes del volumen del molde y la densidad de la muestra que sea el 97% mínimo de la densidad Marshall correspondiente, según lo indicado en la sección 6.2.6.10.3. del Manual de carreteras.

Se evaluaron las mezclas siguiendo el procedimiento establecido en las Normas IRAM 6850 - CEN 12697-22. Se aplicó una carga de 700 N, a una temperatura de 60°C.

Ilustración 50: Configuración de carga - WTT. WHEEL TRACKING TEST. EN 12697-22. IRAM-6850



Fuente: Seminario Virtual – APC

5.3.1. Mezcla con Asfalto Convencional.

Al culminar el proceso de compactación mediante el compactador de placa, se obtienen las densidades y porcentajes de vacíos de las muestras N1 y N2.

Los resultados se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 32: Densidades y vacíos obtenidos - Asfalto convencional.

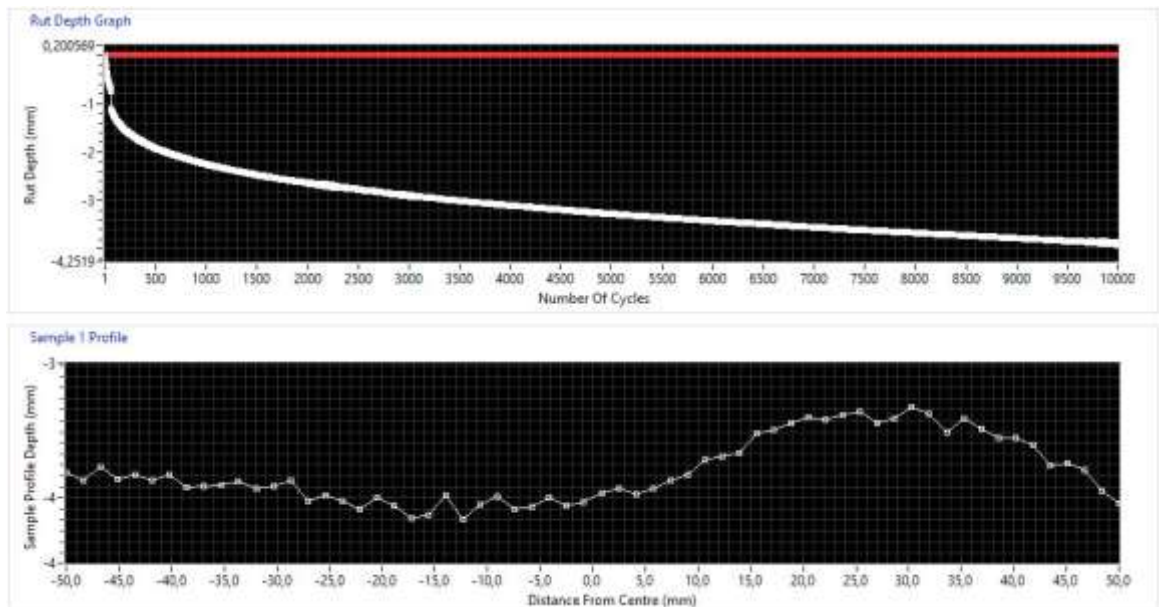
Asfalto Convencional								
Muestra	% ASF. (EN PESO) a	PESO SECO b	PESO EN EL AGUA c	PESO SAT. SUP. SECA d	VOLUM. e= d - c	DENSIDAD f= b / e	DENS. TEÓRICA (RICE) g	VACÍO MEZCL. ASF. h= (g - f) / g
	%	gr.	gr.	gr.	cm3	gr./cm3	gr./cm3	%
N1	4.5	11374.6	6838	11482.6	4644.6	2.449	2.648	7.52
N2		11454.9	6891.3	11511.1	4619.8	2.480	2.648	6.36

Fuente: Propia.

Para la probeta N1 se obtuvo un grado de compactación igual a 97,74% y para la probeta N2 97,9% correspondiente a un 7% de vacíos aproximadamente superando el porcentaje mínimo de 97% exigido por el Manual de carreteras de forma a analizar la influencia de los vacíos en los resultados del ahuellamiento en las mezclas.

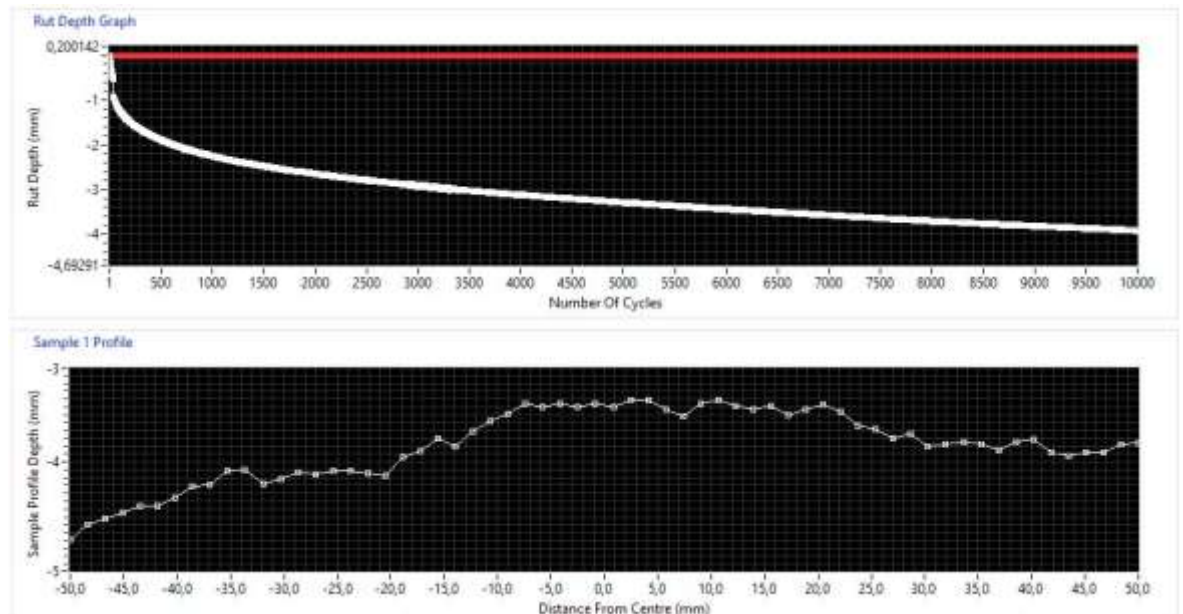
Posteriormente se colocan las probetas en el equipo de WTT, y se obtiene el siguiente grafico para cada mezcla realizada.

Ilustración 51: Diagrama del comportamiento de la mezcla con Asfalto normal - N1



Fuente: Software ECO+ Main Test .(EN 12697-22), CDTV.

Ilustración 52: Diagrama del comportamiento de la mezcla con Asfalto normal – N2



Fuente: Software ECO+ Main Test .(EN 12697-22), CDTV..

5.3.2. Mezcla con Asfalto Modificado.

Al culminar el proceso de compactación mediante el compactador de placa, se obtienen las densidades y porcentajes de vacíos de las muestras M1 y M2.

Los resultados se exponen en la siguiente tabla:

Tabla 33: Densidades y vacíos obtenidos.

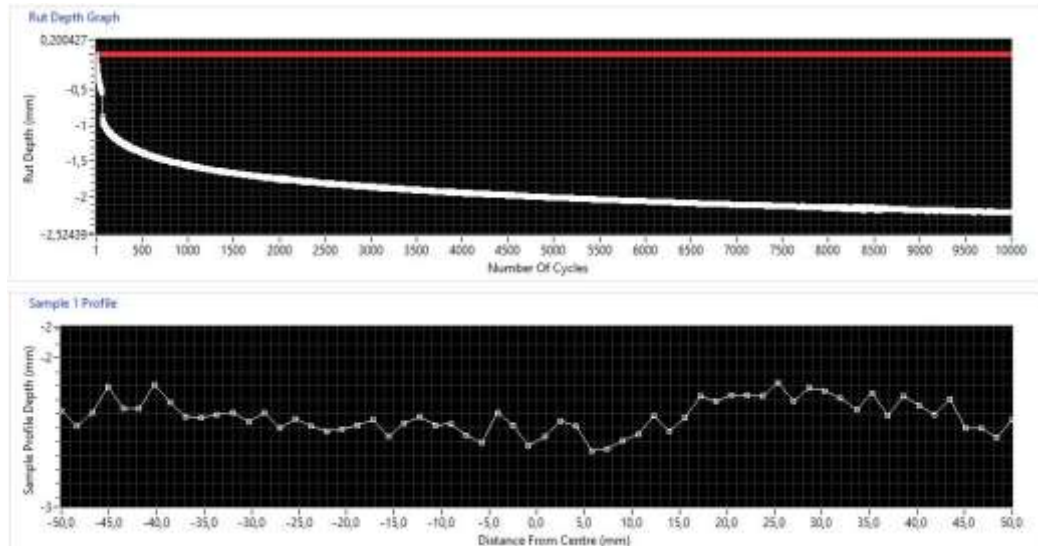
Asfalto modificado								
Muestra	% ASF. (EN PESO) <i>a</i> %	PESO SECO	PESO EN EL AGUA	PESO SAT. SUP. SECA	VOLUM.	DENSIDAD	DENS. TEÓRICA (RICE)	VACÍO MEZCL. ASF. $h = (g - f) / g$ %
		<i>b</i> gr.	<i>c</i> gr.	<i>d</i> gr.	$e = d - c$ cm ³	$f = b / e$ gr./cm ³	<i>g</i> gr./cm ³	
M1	4.6	11426.9	6894.7	11507.5	4612.8	2.477	2.631	5.85
M2		11363.1	6858.4	11464.5	4606.1	2.467	2.631	6.23

Fuente: Propia.

Para la probeta M1 se obtuvo un grado de compactación igual a 98,1 corresponde al 6% de vacíos respecto a la densidad marshall y para la probeta M2 97,77% corresponde al 7% de vacíos respecto a la densidad Marshall, superando el porcentaje mínimo de 97% exigido por el Manual de carreteras de forma a analizar la influencia de los vacíos en los resultados del ahuellamiento en las mezclas.

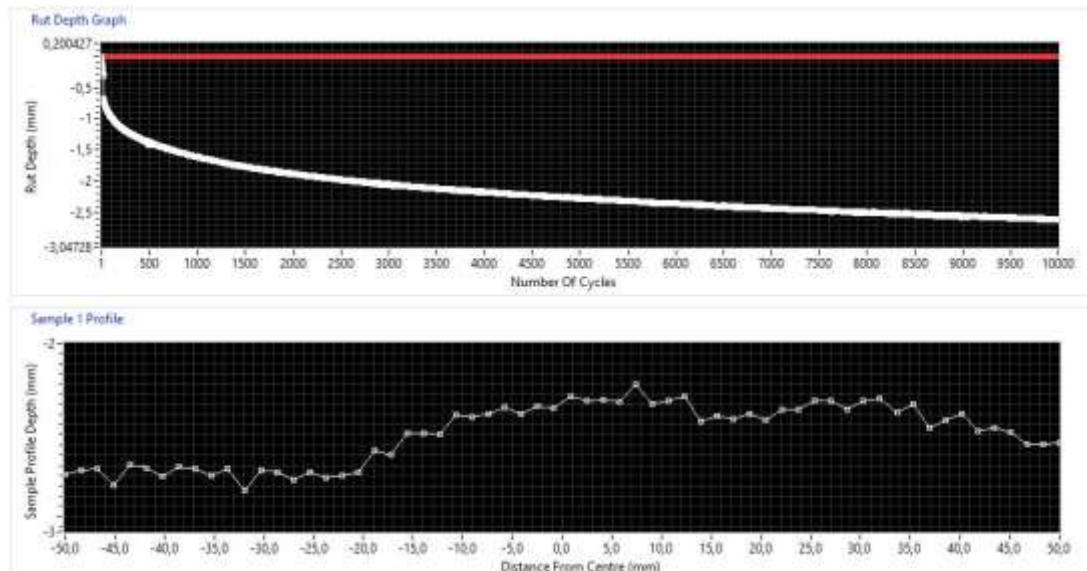
Posteriormente se colocan las probetas en el equipo de WTT, y se obtiene el siguiente grafico para cada mezcla realizada.

Ilustración 53: Diagrama del comportamiento de la mezcla con Asfalto modificado - M1



Fuente: Software ECO+ Main Test .(EN 12697-22), CDTV.

Ilustración 54: Diagrama del comportamiento de la mezcla con Asfalto modificado – M2



Fuente: Software ECO+ Main Test .(EN 12697-22), CDTV.

5.5. Clasificación de tránsito.

Para la realización de la clasificación por tránsito se utilizó la siguiente fórmula, especificada en el manual de carreteras del Paraguay.

$$IT = TMDA_i \times P_d$$

De acuerdo a la siguiente tabla, se puede obtener la clasificación por tránsito de acuerdo al IT obtenido.

Tabla 34: Clasificación por tránsito.

Clasificación por tránsito			
T1	T2	T3	T4
Indice de tránsito (IT) ≥ 1500	800-1499	200-799	≤ 199

Fuente: Manual de Carreteras del Paraguay.

De acuerdo a los datos proveídos, para esta obra, se tiene un valor de $IT \geq 1500$, que corresponde a un tránsito pesado, por lo que la clasificación de tránsito corresponde a un T1.

De los gráficos obtenidos en el capítulo anterior se realiza el cálculo de la Pendiente Media de Deformación (WTS) y la Profundidad Media de la Huella (PRD), y se verifican los valores de modo a determinar la clasificación de tránsito correspondiente de cada mezcla asfáltica.

A continuación, se exponen los resultados y clasificación obtenidos.

Tabla 35: Resumen de resultados

RESUMEN DE RESULTADOS		
N1	MUESTRA 1 CON ASFALTO NORMAL 50/70	CUMPLE PARA T3 Y T4
WTS =	0,121 mm/ 10 ³ cycles	
PRD =	7,6%	
N2	MUESTRA 2 CON ASFALTO NORMAL 50/70	CUMPLE PARA T3 Y T4
WTS =	0,125 mm/ 10 ³ cycles	
PRD =	7,3%	
M1	MUESTRA 1 CON ASFALTO MODIFICADO TIPO 1	CUMPLE PARA T1 Y TODOS LOS DEMAS
WTS =	0,04 mm/ 10 ³ cycles	
PRD =	4,4%	
M2	MUESTRA 2 CON ASFALTO MODIFICADO TIPO 1	CUMPLE PARA T1 Y TODOS LOS DEMAS
WTS =	0,065 mm/ 10 ³ cycles	
PRD =	4,92%	

Fuente: Propia.

5.6. Comparativa de resultados del WTT.

Para este trabajo final de grado nos enfocamos en variar el tipo de cemento asfáltico, conservando la misma estructura granular en ambas mezclas.

En la tabla 38 se muestran los resultados de las mezclas con asfalto convencional y con asfalto modificado tipo 1.

Tabla 36: Comparativa de los resultados entre ambas mezclas.

Descripción	Unidad de medida	CONVENCIONAL	MODIFICADO
WTS	mm. 10-3 ciclos	0.12	0.052
PRD:	%	7.45	4.66
Ahuellamiento final:	mm	3.74	2.3
Compactación:	%	97.8	97.9
Clasificación por tránsito	-	T3 y T4	T1

Fuente: Propia.

El ahuellamiento final mejora en un 61.49% para el asfalto modificado, cabe mencionar que la velocidad media de aumento de huella, WTS para el asfalto convencional es 56.6% mayor que la WTS del asfalto modificado tipo 1.

De acuerdo con el análisis del comportamiento de las mezclas asfálticas mediante la comparación de valores de WTS y ahuellamiento final, se determina que las mezclas asfálticas modificadas con polímeros brindan una mejora significativa en su comportamiento mecánico ya que tienen menor deformación respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Respecto a la clasificación por tránsito se puede observar que la mezcla asfáltica realizada con asfalto normal, cumple para un nivel de tránsito T3 y T4, superando los valores admisibles, pero no verifican los valores de clasificación de tránsito requerida para la obra.

Sin embargo, la mezcla asfáltica realizada con asfalto modificado tipo 1, cumple para un nivel de tránsito T1, por lo tanto, podemos decir que esta mezcla cumple con los valores requeridos para la obra.

5.7. Análisis de precios unitarios.

Tabla 37: Análisis de costos unitarios de la mezcla asfáltica con Asfalto convencional 50/70.

Item N°		Descripción: Carpeta de Concreto asfáltico convencional				
Unidad: m²						
A	Equipos	Potencia	Rendimiento	Horas de Equipo	Costo Horario	Costo Total
		HP	m²/h	h/m²	Gs	Gs
	Compactador Liso Tipo Tandem - Caterpillar CS54B	129 HP	24.00	0.04	290.241	12.093
	Compactador Neumatico - CAT PS360C	130 HP	12.00	0.08	322.287	26.857
	Pala Cargadora - CAT 924K	148 HP	16.67	0.06	296.740	17.204
	Planta Asfáltica - CIBER INOVA modelo 2000 P2		20.00	0.05	1.237.333	61.867
Terminadora de Asfalto - CAT AP655D	174 HP	24.00	0.04	632.086	26.337	
					144.359	
B	Mano de Obra	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Administrador	mes		5.609.000		
	Ayudante administrativo	mes	0.000418	3.584.000	1.498	
	Ayudante de laboratorio	mes	0.000418	3.584.000	1.498	
	Ayudante de planta	mes	0.002508	3.562.084	8.934	
	Ayudante mensual	mes	0.001388	3.584.000	4.975	
	Banderillero mensual	mes	0.000694	3.584.000	2.487	
	Basculero	mes	0.000418	3.584.000	1.498	
	Calderista diurno	mes	0.000418	5.609.000	2.345	
	Calderista Nocturno	mes	0.000418	4.934.000	2.062	
	Electricista	mes		4.259.000		
	Jefe de planta	mes	0.000418	6.284.000	2.627	
	Laboratorista	mes		3.584.000		
Plastillero por mes	mes	0.001388	4.480.000	6.218		
Sereno	mes	0.000418	3.584.000	1.498		
C Producción del Equipo:			1.00 m²/Hs		35.640	
D Costo Unitario de Ejecución=(A+B)/C			(179.999 +		179.999	
E	Materiales	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Arena Lavada	m³		35.000		
	CAP convencional	Ton	0.1135	7.689.300	872.736	
	Energía Eléctrica	kwh	9.37500165	420	3.938	
	Fuel Oil	lt	23	2.850	65.550	
	Gas Oil	lt	0.75	4.900	42.075	
	Mejorador de Adherencia	lt		158.750		
	Piedra Triturada	Ton	2.393	46.000	110.078	
	Relleno Mineral	Ton	0.0242	855.000	20.691	
					1.115.867	
F	Transportes	DMT	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Arena Lavada			1.690		
	Cemento Asfáltico	178 Km	0.114 Ton	389	7.658	
	Concreto Asfáltico	10 Km	2.532 Ton	612	15.497	
Piedra Triturada - Ripio	10 Km	2.393 Ton	458	10.952		
					34.306	
COSTO DIRECTO TOTAL		D+E+F			1.330.172	
GG	GASTOS GENERALES % S/CDT		7.61%	1.330.172	101.226	
Bel	BENEFICIOS E IMPUESTOS % S/CDT		10.57%	1.330.172	140.623	
COSTO UNITARIO					1.572.022	
CU	COSTO UNITARIO TOTAL CDT+GG+Bel				1.572.022	
IVA	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO		10.00%	1.572.022	157.202	
CU+IVA COSTO UNITARIO ADOPTADO					1.729.224	
1 Us\$= 7,100 Gs						

Fuente: Propia.

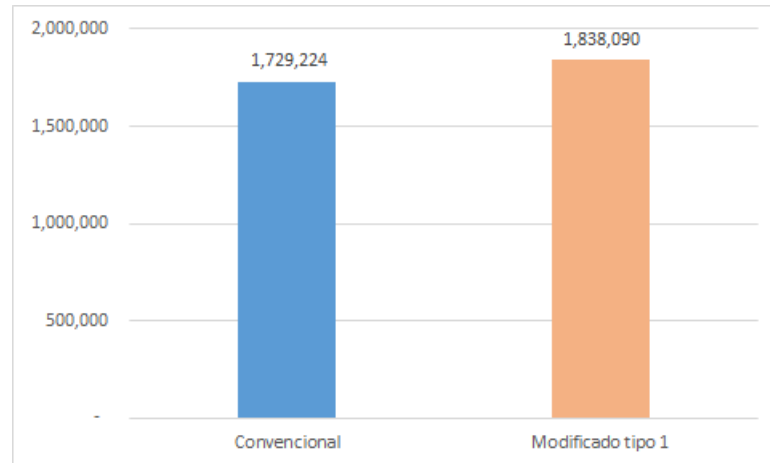
Tabla 38: Análisis de costos unitarios de la mezcla asfáltica con asfalto modificado tipo1.

Item N°		Carpeta de Concreto asfáltico modificado				
Descripción:		m³				
Unidad:		m³				
A	Equipos	Potencia	Rendimiento	Horas de Equipo	Costo Horario	Costo Total
		HP	m³/h	h/m³	Gs	Gs
	Compactador Liso Tipo Tandem - Caterpillar CS54B	129HP	24.00	0.04	290,241	12,093
	Compactador Neumatico - CAT PS360C	130 HP	12.00	0.08	322,287	26,857
	Pala Cargadora - CAT 924K	148 HP	16.67	0.06	286,740	17,204
	Planta Asfáltica - CIBER INOVA modelo 2000 P2		20.00	0.05	1,237,333	61,867
Terminadora de Asfalto - CAT AP655D	174HP	24.00	0.04	632,086	26,337	
					144,359	
B	Mano de Obra	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Administrador	mes		5,609,000		
	Ayudante administrativo	mes	0.000418	3,584,000	1,498	
	Ayudante de laboratorio	mes	0.000418	3,584,000	1,498	
	Ayudante de planta	mes	0.002508	3,562,084	8,934	
	Ayudante mensual	mes	0.001388	3,584,000	4,975	
	Banderillero mensual	mes	0.000694	3,504,000	2,487	
	Basculero	mes	0.000418	3,584,000	1,498	
	Calderista diurno	mes	0.000418	5,609,000	2,345	
	Calderista Nocturno	mes	0.000418	4,934,000	2,062	
	Electricista	mes		4,259,000		
	Jefe de planta	mes	0.000418	6,284,000	2,627	
	Laboratorista	mes		3,584,000		
Restillero por mes	mes	0.001388	4,480,000	6,218		
Sereno	mes	0.000418	3,504,000	1,490		
C Producción del Equipo:			1.00 m³/Hic		35,640	
D Costo Unitario de Ejecución=(A+B)/C					179,999	
E	Materiales	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Arena lavada	m³		35,000		
	CAP modificado	Ton	0.113	8,470,300	957,144	
	Energía Eléctrica	kva	9.37500165	420	3,938	
	Fuel Oil	lit	23	2,850	65,550	
	Gas Oil	lit	8.75	4,900	42,875	
	Mejorador de Adherencia	lit		158,750		
	Piedra Triturada	Ton	2.385	46,000	109,710	
	Relleno Mineral	Ton	0.024	855,000	20,520	
					1,199,736	
F	Transportes	DMT	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	
				Gs	Gs	
	Arena Lavada			1,690		
	Cemento Asfáltico	178 Km	0.113 Ton	389	7,823	
	Concreto Asfáltico	10 Km	2.523 Ton	612	15,442	
Piedra Triturada - Rigio	10 Km	2.385 Ton	458	10,915		
					34,180	
COSTO DIRECTO TOTAL		D+E+F			1,413,915	
GG	GASTOS GENERALES % S/CDT		7.61%	1,413,915	107,599	
Bel	BENEFICIOS E IMPUESTOS % S/CDT		10.57%	1,413,915	149,477	
COSTO UNITARIO					1,670,991	
CU	COSTO UNITARIO TOTAL CDT+GG+Bel				1,670,991	
IVA	IMPUESTO AL VALOR AGREGADO		10.00%	1,670,991	167,099	
CU+IVA	COSTO UNITARIO ADOPTADO				1,838,090	
1 Us\$= 7,100 Gs						

Fuente: Propia.

5.7.1. Comparativa de costos.

Ilustración 55: Análisis comparativo de costos unitarios.



Fuente: Propia.

Podemos observar que la mezcla asfáltica realizada con CAP modificado tipo 1, tiene una diferencia en costos de 6,3% respecto a una mezcla realizada con cemento asfáltico convencional.

CAPITULO 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1. CONCLUSIONES.

- Se demostró la hipótesis del proyecto *“La utilización de un cemento asfáltico modificado nos ofrecerá una mezcla asfáltica capaz de resistir las cargas de tránsito y las altas temperaturas que se manifiestan actualmente, en comparación al cemento asfáltico convencional 50/70 utilizado en el país. Obteniendo de esta manera un mejor comportamiento a la resistencia al ahuellamiento o deformación permanente.”* Ya que la mezcla asfáltica modificada demostró tener un mejor comportamiento mecánico y mayor desempeño que una mezcla asfáltica convencional demostrados por medio de los resultados de Estabilidad y flujo y una mayor resistencia ante la deformación permanente de acuerdo a los resultados del WTT.
- De los resultados obtenidos por los ensayos realizados, podemos observar que la mezcla realizada con cemento asfáltico modificado, evidencia mejoras respecto a la mezcla convencional, tales como la estabilidad ya que presenta un aumento de 0.3% obteniéndose un valor de 14.9 kN. Respecto a las propiedades volumétricas se observa que en ambas mezclas se cumple la condición de $G_{sa} > G_{se} > G_{sb}$, y que la mezcla con asfalto modificado presenta un menor porcentaje de vacíos de aire (V_a), lo que indica una mejor compactación.
- La utilización de un cemento asfáltico modificado respecto al convencional influye en un 6,3% más en el costo del concreto asfáltico.
- En base a los resultados y análisis obtenidos, podemos decir que la utilización de un asfalto modificado proporciona una mayor resistencia ante la deformación permanente, siempre y cuando las cargas se encuentren dentro de los límites de cargas permitidos por ley.

6.2. RECOMENDACIONES.

- Teniendo en cuenta las altas temperaturas y cargas que se manifiestan actualmente en el país, la utilización de un asfalto modificado en las mezclas asfálticas acaba siendo una alternativa eficiente para ser utilizada en pavimentos con características similares, ya que aporta una mayor resistencia y durabilidad al pavimento, alargando de esta manera su vida útil y reduciendo los costos de mantenimiento.
- Realizar la verificación a la deformación permanente utilizando el WTT variando la granulometría de la mezcla asfáltica y manteniendo los mismos cementos asfálticos de modo a obtener más información sobre el comportamiento de la mezcla respecto a la variación de vacíos y de la estructura granular.

CAPITULO 7 BIBLIOGRAFIA.

- [1 D. 5. días, «5 días,» 12 marzo 2021. [En línea]. Available:
] <https://www.5dias.com.py/locales/paraguay-el-peor-en-desarrollo-de-carreteras>.
[Último acceso: 4 octubre 2022].
- [2 S. A. U. T. C. W. MACEDO SEMINARIO, TESIS: INFLUENCIA DEL CAUCHO
] RECICLADO UTILIZADO COMO AGENTE MODIFICANTE EN LOS
PARÁMETROS DE DISEÑO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA, LIMA - PERU, 2020.
- [3 M. V. (traductor), Manual del Asfalto, Bilbao: Ediciones URMO, 1964.
]
- [4 F. A. W. RODRIGUEZ, Tesis “ANÁLISIS DE PAVIMENTO ASFÁLTICO
] MODIFICADO CON POLIMERO, Valdivia - Chile, 2008.
- [5 Fundacion de investigacion y educacion de la Asociacion Nacional de Pavimentos
] Asfálticos, Hot Mix Asphalt material Mixture Design, Lanham, 1996.
- [6 I. Kett, ASPHALT MATERIALS AND MIX DESIGN MANUAL, Westwood, N.J.:
] Noyes, 1998.
- [7 Asphalt institute, PRINCIPIOS DE CONSTRUCCION DE PAVIMENTOS DE
] MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE, 1982.
- [8 Aguilar Raya, Esteban Arizapana, Solano Ramos, «slideshare,» 2014. [En línea].
] Available: <https://es.slideshare.net/rodrigoarroyo92351/expo-diapos-reologia-del-asfalto#:~:text=CARACTER%C3%8DSTICAS%20REOL%C3%93GICAS%20DEL%20ASFALTO%20La,propiedad%20muy%20importante%3A%20la%20viscosidad..>
[Último acceso: 2022].
- [9 J. (. E. d. I. f. d. u. e. C. R. d. p. m. d. a. i. e. p. U. d. I. e. I. v. L. N. d. M. y. M. E.
] alazar, «Evaluación de la factibilidad del uso en Costa Rica de polímeros
modificantes de asfalto incorporados en planta.,» San Jose - Costa rica, 2008.
- [1 Prada, Oscar; Rondón, Hugo; González, Gioconda; Reyes, Freddy,
0] «Comportamiento de dos mezclas asfálticas venezolanas en caliente, modificadas
con,» *Revista Ciencia e Ingeniería.* , vol. Vol 31, nº N° 2, p. 7, 2010.
- [1 E – Asphalt, « E – Asphalt,» [En línea]. Available: [https://e-asfalto.com/asfaltos-](https://e-asfalto.com/asfaltos-1)
1] modificados/. [Último acceso: marzo 2022].
- [1 H. A. R. -. F. A. Reyes, PAVIMENTOS, Materiales, Construccion y Diseño, Bogota:
2] Macro, 2015.
- [1 A. P. Rodríguez., Tesis: Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de
3] mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de
pista, Barcelona, 2004.
- [1 APC, Manual de carreteras del Paraguay - Revision 2019, asuncion: Visualmente,
4] 2019.
- [1 C. A. J. B., Analisis del comportamiento de mezclas asfalticas a la fisuracion por
5] fatiga mediante la aplicacion de un nuevo ensayo dinamico a traccion directa, Tesis
Doctoral, Escuela Tecnica superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos,
Barcelona , 2002.
- [1 Carmen Esparza Villalba, «slideshare,» junio 2009. [En línea]. Available:
6] <https://es.slideshare.net/UCGcertificacionvial/mezclas-asflticas-en-calientesemana-16-1588747>. [Último acceso: 2022].

-
- [1 I. C. C. A. M. Rosales, Tesis: MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE
7] UTILIZANDO ASFALTO MODIFICADO, REVISIÓN Y PROPUESTA DE
ESPECIFICACIÓN, Guatemala, 2012.
- [1 A. H. Delgado, «Diseño de mezclas asfálticas densas en caliente en función del
8] nivel de tránsito.,» Publicación Técnica No. 602, Sanfandila, Qro, 2020.
- [1 H. W. G. H. A. D. R. R. JOSÉ MAURICIO CORTEZ GARCÍA, "GUÍA BÁSICA DE
9] DISEÑO, CONTROL DE PRODUCCIÓN Y COLOCACIÓN DE MEZCLAS
ASFÁLTICAS EN CALIENTE", CIUDAD UNIVERSITARIA: UNIVERSIDAD DE EL
SALVADOR, 2007..
- [2 H. D. J. G. P. Garnica, Aspecto del diseño volumetrico de Mezclas asfalticas.,
0] Sanfandila, Qro, 2004.
- [2 N. J. P. -. I. O. R. -, Tesis de Becarios de LEMaC: Criterios de valorización de
1] capas asfálticas en caliente para carpetas asfálticas y resistencia al ahuellamiento,
2010.
- [2 H. L. D. -. O. R. Rebollo, «AHUELLAMIENTO EN PAVIMENTOS ASFÁLTICOS
2] UTILIZANDO GEOSINTÉTICOS,» de *LEMaC; Centro de Investigaciones Viales de
la Universidad Tecnológica Nacional*, La Plata, Buenos Aires, Argentina., 2017.
- [2 A. M. Fonseca, Ingeniería de pavimentos para carreteras, Bogota: Universidad
3] Católica de Colombia., 2002.
- [2 A. Saucedo Vidal, Tesis "Concreto hidráulico permeable, una alternativa para la
4] recarga de los mantos acuíferos del Valle de México", Mexico, 2012.
- [2 A. B. V. D. I. M. Becerril, Tesis "PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO DE
5] PAVIMENTOS FLEXIBLES EN LA CARRETERA: BARRANCA LARGA EN EL
ESTADO DE OAXACA", Mexico, 2016.
- [2 I. N. W. H. GUERRERO, LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS MEZCLAS
6] ASFÁLTICAS Y EL CONSECUENTE DETERIORO DE LOS PAVIMENTOS
ASFÁLTICOS EN EL PERÚ, Lima - Peru, 2011.
- [2 J. E. a. F. N. F. MONISMITH C. L., Improved Asphalt Mix Design, Proceedings, The
7] Association of Asphalt Paving Technologists., Williamsburg, Virginia: Volumen 54,
1985.
- [2 L. A. C. Arias, DETERMINACIÓN DE FACTORES DE CAMIÓN PARA EL DISEÑO
8] DE PAVIMENTOS FLEXIBLES EN GUATEMALA, Guatemala, 2010.
- [2 L. E. F. CACHAY, Efecto de la incorporación por vía seca, del polvo de neumático
9] reciclado, como agregado fino en mezclas asfálticas, Lima - Peru, 2014.
- [3 Normativa para la Infraestructura del Transporte, «Materiales Asfálticos, Aditivos y
0] Mezclas,» de *CMT- Características de los materiales*, Mexico , 2016, p. 18.
- [3 Gobierno de Mexico - Normativa para la infraestructura del transporte, «04.
1] pavimentos,» de *CTR- Construccion*, 2006, p. 27.
- [3 G. T. -. H. Carrillo, *Análisis de casos de ahuellamiento en Mezclas Asfálticas*
2] *Chilenas*.
- [3 S. A. C. Elton R. Brown, A NATIONAL STUDY OF RUTTING IN HOT MIX (HMA)
3] PAVEMENTS, Charleston, SC: NCAT, 1992.
- [3 A. M. Fonseca, Ingeniería de Pavimentos, Bogota - Colombia: Graficas Ambar,
4] 2008.
- [3 Asociación Española de Normalización y certificación., «Asfaltos y construcciones,»
5] de *Norma Española*, Madrid España , AENOR , 2008, p. 31.
- [3 D. N. D. VIALIDAD, «VN - E38 - 86 Determinación de la lajosidad y elongación en


- 6] agregados,» de *NORMA DE ENSAYOS*, BUENOS AIRES, pp. 188 - 192.
- [3 P. G. Anguas, «Mecánica de materiales para Pavimentos,» de *Publicación Técnica*
- 7] No. 197, Sanfandila, Qro, SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y
TRANSPORTES - INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, 2002, p. 234.
- [1] Guillermo Thenoux Z., Felipe Halles A., Álvaro González
V., «GUÍA DE DISEÑO ESTRUCTURAL DE
PAVIMENTOS,» pp. 4-19.

CAPITULO 8 ANEXO.

8.1. Agregados pétreos.

8.1.1. Índice de lajas y elongación.

Tabla 39: Índice de Lajosidad y Elongación triturada 5ta

				DETERMINACION DE LAJOSIDAD Y ELOGACION EN AGREGADOS VN - E38-86		Tipo de agregado: Trit. 5ta			
Clase granulometrica	Porcentaje de retenido de la muestra /Ri/	Porcentaje de retenido de la muestra Pi > de 100 particulas	INDICE DE LAJOSIDAD			INDICE DE ELONGACION			
			Particulas Analizadas que pasan por la ranura		IL = IlixRi	Particulas Analizadas que no pasan por entre las barras		IEi = IEixRi	
			Peso/ gr (PLi)	% / Ili			Peso/ gr (PLi)		% / IEi
A	63mm - 51mm (2 1/2" - 2")								
B	51mm - 38mm (2" - 1 1/2")								
C	38mm - 25mm (1 1/2" - 1")								
D	25mm - 19mm (1" - 3/4")								
E	19mm - 12,7mm (3/4" - 1/2")	68,7%	1344	395	29,46%	20,23	86	6,398	4,395
F	12,7mm - 9,5mm (1/2" - 3/8")	18,2%	706	159	22,52%	4,098	274	38,81	7,06
G	9,5mm - 4,8mm (3/8" - 1/4")	11%							
IR			ΣIL-ΣIlixRi = 24,32 % <= 25%			ZIE = ΣIEixRi = 11,45% <= 25%			

Fuente: Propia.

Tabla 40: Índice de Lajosidad y Erogación – triturada 4ta.

				DETERMINACION DE LAJOSIDAD Y ELOGACION EN AGREGADOS VN - E38-86							
		Tipo de agregado: Trit. 4ta									
Clase granulometrica	Porcentaje de retenido de la muestra /Ri/	Porcentaje de retenido de la muestra Pi > de 100 particulas	INDICE DE LAJOSIDAD				INDICE DE ELONGACION				
			Particulas Analizadas que pasan por la ranura		IL = ILixRi	Particulas Analizadas que no pasan por entre las barras		IEi = IEixRi			
			Peso/ gr (PLi)	% / ILI		Peso/ gr (PLi)	% / IEI				
A	63mm - 51mm (2 1/2" - 2")										
B	51mm - 38mm (2" - 1 1/2")										
C	38mm - 25mm (1 1/2" - 1")										
D	25mm - 19mm (1" - 3/4")										
E	19mm - 12,7mm (3/4" - 1/2")	19,5%	835	340	40,71%	7,93%	53	6,347	1,23		
F	12,7mm - 9,5mm (1/2" - 3/8")	70,7%	1621	98	6,04%	4,27%	204	12,58	8,894		
G	9,5mm - 4,8mm (3/8" - 1/4")	9,7%									
IRI				$\Sigma ILi - \Sigma ILixRi = 12,2\% \leq 25\%$				$\Sigma IEi = \Sigma IEixRi = 10,12\% \leq 25\%$			

Fuente: Propia.


8.1.2. Polvo Adherido.

Ilustración 56: Ensayo de polvo adherido.



Fuente: Propia.


Tabla 41: Determinación del polvo adherido.

		DETERMINACIÓN DEL POLVO ADHERIDO	
Método de ensayo:	VN - E68 - 75	<input type="checkbox"/>	
Método de ensayo:		<input type="checkbox"/>	
OBRA :	TESIS		
Tipo de Muestra:	Piedra Trit. 5ta		
Fecha:			
			1
Peso de la muestra	<i>gr.</i>		200.0
Cantidad en Tubo de Asentamiento	<i>ml</i>		50.0
Lectura leído a las 24 hs	<i>ml</i>		0.40
Resultado de ensayo	%		0.8%
			%
Max. Admisible en Rodamiento			1.2%
Observaciones:			

Fuente: Propia.

8.1.3. Desgaste de los ángeles.



Tabla 42: Desgaste de los ángeles.

		Ensayo de desgaste de los angeles (ASTM C-131)			
OBRA :	Proyecto final de grado.	FECHA:			
<i>Cantera:</i>	Tecnoedil S.A.				
<i>Progresiva:</i>		Método de ensayo:		ASTM C-131	
Tipo de árido:	Agregado Grueso y Fino				
PROPORCIONES DE LA MEZCLA:					
Tamices Standart		Granulometria de la mezcla			
Pasante	Retenido en	A	B	C	D
1 1/2"	1"	1,250.0			
1"	3/4"	1,250.0			
3/4"	1/2"	1,250.0	2,500.0		
1/2"	3/8"	1,250.0	2,500.0		
3/8"	1/4"			2,500.0	
1/4"	N°4			2,500.0	
N°4	N°8				5,000.000
Carga abrasiva		12	11	8	6
RESULTADOS PARA 500 REVOLUCIONES:					
Peso total de material seco (gr)				5,000.00	
Peso de material retenido en tamiz N° 12 (gr)				3790,2	
Diferencia (gr)				1209,8	
Desgaste %				24,2	
RESULTADOS PARA 500 REVOLUCIONES:					
* Temperatura de Ensayo a 25°C					
* Desgaste maximo admisible 25%					

Fuente: Propia

8.1.4. Ensayo de adherencia.

Tabla 43: Adherencia del agregado y el ligante asfáltico.

		ADHERENCIA AGREGADO - LIGANTE	
OBRA: TESIS			
Método de Ensayo:	NLT - 166/76		
Material:	Agregado Grueso	Fecha:	7 de abril de 2022
Tipo de Mezcla			
Ejecución del Ensayo - Asfalto 50/70			
Peso de la muestra :	100	g	
Peso del Asfalto:	5.5	g	
Temp. De Mezclado:	150°C		
Tiempo de reposo	18	hs	
Observaciones:	Se observa mas del 95% de recubrimiento del asfalto en el agregado		
Ejecución del Ensayo - CAP con Polimero			
Peso de la muestra :	100	g	
Peso del Asfalto:	5.5	g	
Temp. De Mezclado:	150°C		
Tiempo de reposo:	18	hs	
Observaciones:	Se observa mas del 95% (98% aprox.)de recubrimiento del asfalto en el agregado		
			

Fuente: Propia.

8.1.5. Peso específico y absorción.

Tabla 44: Peso específico y absorción.

Muestra		Arido Grueso			
		4ta		5ta	
		1	2	1	2
a	Muestra Seca	g	3,048.8		2,331.3
b	Muestra Sat. Sup. Seca	g	3,064.7		2,353.4
c	Muestra en agua	g	1,982.0		1,518.0
(a - c)	Volumen Muestra Seca	cm ³	1,066.8		813.3
(b - c)	Volumen Sat. Sup. Seca	cm ³	1,062.7		835.4
(b - a)	Peso del Agua Absorbida	g	15.9		22.1
(a/a) - c	Peso Esp. Aparente Seco [Gsb]	g/cm ³	2.858		2.866
(b/b) - c	Peso Esp. Aparente Sat. Sup. Seca	g/cm ³	2.831		2.817
(a/b) - c	Peso Especifico Seco [Gsb]	g/cm ³	2.816		2.791
	Promedio		2.816		2.791
(b - a/a) x 100	Absorción	%	0.52		0.95

Muestra		Agregado Fino	
		Trit. 6ta	
		1	
a	Picnometro N° Peso del Material Seco	g	493.0
b	Peso del Picnometro lleno de agua	g	1,310.5
c	Peso del Pic. + Material + Agua	g	1,636.3
d	Peso del Mat. Saturado S. Seca	g	500.1
a/(a+b-c)	Peso Especifico Aparente [Gsa]	g/cm ³	2.949
d/(b+d-c)	Peso Especifico Saturado	g/cm ³	2.869
a/(b+d-c)	Peso Especifico Seco [Gsb]	g/cm ³	2.828
(c-a)/a x 100	Absorción %	%	1.44

Fuente: Propia.

8.1.5. Peso específico de la cal.


Tabla 45: Peso específico de la cal.

		PESO ESPECIFICO CAL HIDRATADA	
Obra:	Tesis.	Fecha:	
Norma:	VN - E15 - 89	Muestra:	1
Material:	Cal Aerea Hidratada		
Datos del Ensayo			
Prueba		1	
Peso de la Muestra [g]		48.2	
Vol. Desplazado [cm ³]		21.1	
Resultado		2.284	
Fórmula :			
Peso Específico Aparente =	$\frac{P}{V}$	g/cm ³	2.284 g/cm ³
Donde:			
P:	Peso Seco del Material introducido en el Voluménmetro		
V:	Volumen del kerosene anhidro desplazado por la muestra		

Fuente: Propia.

8.1.6. Durabilidad por ataque de sulfatos.

Tabla 46: Ensayo de durabilidad.

		DURABILIDAD POR ATAQUE DE SULFATOS		
OBRA :	TESIS	FECHA:		
Contratista:				
Progresiva:		Método de ensayo:	IRAM 1525	
Tipo de árido:	Agregado Grueso			
DETALLE Y RESULTADOS DEL ENSAYO				
Material que pasa el tamiz (m.m.)	Material que retiene el tamiz (m.m.)	Graduación de la muestra original %	Masa de la fracción antes del ensayo (gramos)	Material que pasa el tamiz después del ensayo (pérdida real) %
19	9.6	90	1000	0.1
				TOTAL

Fuente: Propia.



8.1.7. Ensayos de cubicidad.

Ilustración 57: Cubicidad 5ta.



Fuente: Propia.

Tabla 47: Determinación del factor de cubicidad – 5ta.

		DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CUBICIDAD						
Obra:	Proyecto final de grado		Muestra N°:	1				
Fecha:		Gradación:	"B"		Norma:	VN - E16 - 67		
Material:	5ta							
Fracción	Pasante Tamiz Directriz	Retenido Tamiz	Peso Inicial grs.	AGREGADO RETENIDO POR LA CRIBA REDUCTORA				Peso de material retenido en el fondo grs.
				I Peso B grs.	R I Peso C %	II Peso D grs.	R II Peso E %	
1	3/4"	5/8"	676.0	574.5	85.0	84.0	12.4	16.5
2	5/8"	1/2"	464.0	364.0	78.4	83.5	18.0	16.5
3	1/2"	3/8"	623.5	510.0	81.8	98.0	15.7	15.5
				Total=	245.2	Total=	46.1	
Factor de Cubicidad:	F=	$\frac{R I + 1/2 R II}{100 \times n}$	0.89	Limite inferior	0.50	Optimo	1.00	
Donde:	F= Factor de cubicidad RI= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora I RII= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora II n= número de tamaño directriz correspondientes a la muestra analizada							
 Julio Villalba Laboratorista								

Fuente: Propia.

Ilustración 58: Cubicidad 4ta.



Fuente: Propia.


Tabla 48: Determinación del factor de cubicidad - 4ta.

		DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE CUBICIDAD								
Obra:		Proyecto final de Grado.			Muestra N°:		1			
Fecha:					Gradación:		"B"			
Material:		4ta.							Norma:	VN - E16 - 67
Fracción	Pasante Tamiz Directriz	Retenido Tamiz	Peso Inicial grs.	AGREGADO RETENIDO POR LA CRIBA REDUCTORA				Peso de material retenido en el fondo grs.		
				Peso B	Peso C	Peso D	Peso E			
1	1 1/4"	1"	1,124.5	1,023.5	91.0	101.0	9.0	0.0		
2	1"	3/4"	1,808.0	1,779.0	98.4	29.0	1.6	0.0		
3	3/4"	5/8"	118.0	118.0	100.0	0.0	0.0			
				Total=	289.4	Total=	10.6			
Factor de Cubicidad:		F=	$\frac{RI + 1/2 RII}{100 \times n}$	0.98	<i>Límite inferior</i>		<i>Óptimo</i>			
					0.50		1.00			
Donde:		F= Factor de cubicidad								
		RI= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora I								
		RII= Porcentaje de partículas retenidas en la criba reductora II								
		n= número de tamaño directriz correspondientes a la muestra analizada								
 Julio Villaalba Laboratorista										

Fuente: Propia.

8.1.8. Ensayos de Micro Deval.

Ilustración 59: Ensayo de Micro Deval.

	MÉTODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN DE ÁRIDOS GRUESOS Y FINOS UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL (ASTM D6928-10 AASHTO TP58-02)		
	Material:	Agregado grueso (triturada 5ta)	
Peso inicial			1500 gr
Peso Final			1384.1 gr
Resultado			7.73 <= 20%



Fuente: Propia:

Tabla 49: Ensayo de micro deval.

Fuente: Propia.

8.2. Cemento asfáltico.

8.2.1. Ensayo de película delgada.

Ilustración 60: Ensayo de película delgada.



Fuente: Propia.

Tabla 50: Resultados del Ensayo.

 MÉTODO DE ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA (ASTM D 1754 - AASHTO T179-05)				 MÉTODO DE ENSAYO DE PELÍCULA DELGADA (ASTM D 1754 - AASHTO T179-05)			
CAP 50/70 ASFALTO NORMAL				CAP 50/70 MODIFICADO TIPO 1			
	Registro de masas	M1	M2		Registro de masas	M1	M2
Antes	Masa del frasco	134.7	153.47	Antes	Masa del frasco	148.9	155.8
	Masa del frasco + asfalto	169.9	188.55		Masa del frasco + asfalto	184	190.8
	Masa de Asfalto	35.2	35.08		Masa de Asfalto	35.1	35
Despues	Masa del frasco + Asfalto	158.29	188.86	Despues	Masa del frasco + Asfalto	184.1	190.6
	Cambio de masa %	0.93%	1%		Cambio de masa %	1.00%	1%
	Promedio %	0.96% <= 1%			Promedio %	0.999% <= 1%	

Fuente: Propia.

8.2.3. Punto de ablandamiento.

Ilustración 62: Anillo y bola.



Fuente: Propia.

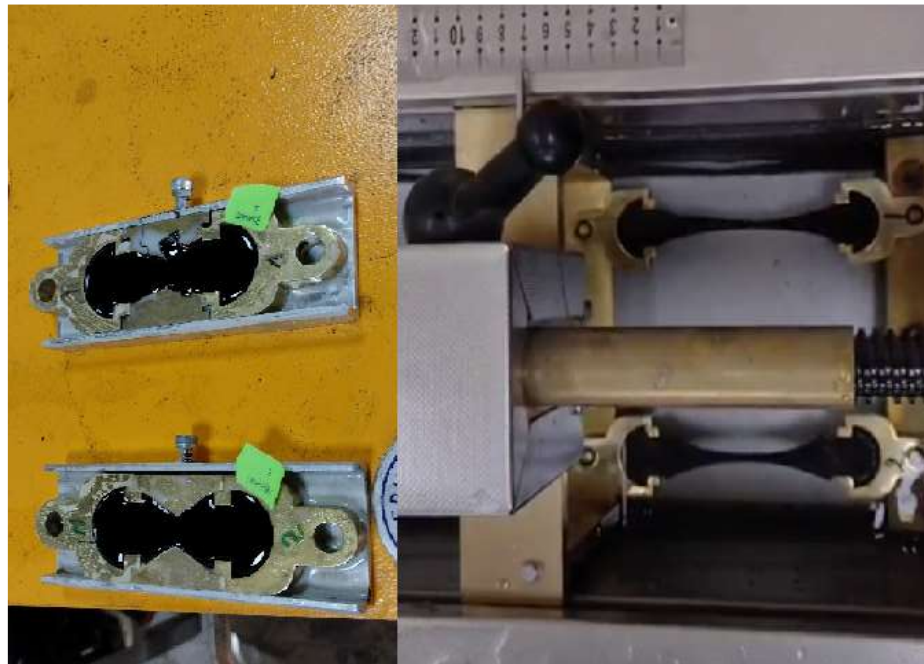
Tabla 52: Resultados de ensayo de ablandamiento.

INFORME DE ENSAYO			INFORME DE ENSAYO		
Anillo y Bola			Anillo y Bola		
Tipo de Asfalto: CAP 50/70 TIPO 1 modif			Tipo de Asfalto: CAP 50/70		
Resultados			Resultados		
Anillo y Bola			Anillo y Bola		
Bola	°C	Especif,	Bola	°C	Especif,
A	55	50 min	A	47.5	50 min
B	57		B	47.1	
Prom.	56		Prom.	47.3	

Fuente: Propia.

8.2.4. Ductilidad.

Ilustración 63: Ensayo de Ductilidad - asfalto normal y modificado.



Fuente: Propia.

Tabla 53: Resultados del ensayo de ductilidad.

INFORME DE ENSAYO			INFORME DE ENSAYO		
Ductilidad			Ductilidad		
Tipo de Asfalto: CAP 50/70 TIPO 1 modif			Tipo de Asfalto: CAP 50/70		
Resultados			Resultados		
muestra	cm	Especif,	muestra	cm	Especif,
1	61		1	86.5	
2	61.1		2	85	
Prom.	61		Prom.	85.75	

Fuente: Propia.

Tabla 54: Resultados de ductilidad del residuo.

INFORME DE ENSAYO			INFORME DE ENSAYO		
Ductilidad			Ductilidad		
Tipo de Asfalto: CAP 50/70 TIPO 1 modif			Tipo de Asfalto: CAP 50/70		
Resultados			Resultados		
muestra	cm	Especif,	muestra	cm	Especif,
1	19.5		1	61	
2	21		2	62.5	
Prom.	20.25		Prom.	61.75	

Fuente: Propia.

8.2.5. Viscosidad Rotacional Brookfield.

Ilustración 64: Ensayo de Viscosidad.



Fuente: Propia.

Tabla 55: Resultados de Viscosidad Rotacional Brookfield

ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD					ENSAYO DE VISCOSIDAD ROTACIONAL BROOKFIELD				
Norma de ensayo: AASHTO TP 48					Norma de ensayo: AASHTO TP 48				
OBRA : TESIS					OBRA : Alumna Arammi				
Tipo de Asfalto: Asfalto 50/70 Tipo 1					Tipo de Asfalto: Asfalto 50/70				
Spindle N°	27				Spindle N°	27			
	R.P.M	Torque	Lect. Prom.			R.P.M	Torque	Lect. Prom.	
Viscosidad Rotacional a 135 °C	10.0	32.0%	0.619	Pa-s	Viscosidad Rotacional a 135 °C	10.0	32.0%	0.348	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 150 °C	10.0	32.0%	0.334	Pa-s	Viscosidad Rotacional a 150 °C	10.0	32.0%	0.141	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 170 °C	15.0	21.0%	0.12	Pa-s	Viscosidad Rotacional a 170 °C	15.0	21.0%	0.07	Pa-s
Viscosidad Rotacional a 190 °C				Pa-s	Viscosidad Rotacional a 190 °C				Pa-s

Fuente: Propia.

8.2.6. Torsión Elástica.

Tabla 56: Resultados del ensayo de Torsión Elástica - Asfalto modificado.

Torsion elastica		
INFORME DE ENSAYO		
Torsion elastica		
Tipo de Asfalto: CAP 50/70 TIPO 1		
Resultados		
Torsion elastica		
%	RANGO	
64	50	min

Fuente: Propia.

8.2.7. Punto de inflamación y punto de fulgor.

Tabla 57: Resultados del ensayo.

INFORME DE ENSAYO			INFORME DE ENSAYO		
<u>Punto de inflamacion y punto de fulgor</u>			<u>Punto de inflamacion y punto de fulgor</u>		
Tipo de Asfalto:	CAP 50/70 normal		Tipo de Asfalto:	CAP 50/70 TIPO 1	
Resultados			Resultados		
Punto de inflamacion	C°	280	Punto de inflamacion	C°	284
Punto de fulgor:			Punto de fulgor:		
°C	RANGO		°C	RANGO	
260	235	min	264	230	min

Fuente: Propia.

8.2.8. Certificados de asfaltos.

Ilustración 65: Certificado de asfalto normal 50/70.



Número: 1496-20 G

CÓPIA

CERTIFICADO DE ENSAIO

Produto: CIMENTO ASFALTICO 50/70		Código: 71K		
Local de Amostragem: TQ 2954391	Laboratório: REPAR/PPO/CQ			
Data/ hora Amostragem: 02/08/20 17:55	Endereço: Rodovia do Xisto (BR-476), km 16			
Data/ hora Recebimento: 02/08/20 18:00	83.707-440, Araucária - PR			
	Telefone: +55 41 36412846 Fax: +55 41 36412846			

Característica	Método	Especificação	Resultado	Unidade
PENETRACAO	D 5	50 a 70	68	0,1 mm
PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	46 min	49	grau C
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROLA 135 GC	E 102	141 min	181	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD 135GC-SP21 20RPM	D 4402	274 min	313	cp
VISC. SSF, 150GC	E 102	50 min	85	s
VISCOSIDADE BROKFIELD 150 GC-SP21	D 4402	112 min	181	cp
VISCOSIDADE SAYBOLT FUROLA 177 GC	E 102	30 a 150	34	s
VISCOSIDADE BROOKFIELD A 177GC SP21	D 4402	57 a 265	63	cp
RTFOT PENETRACAO RETIDA	D 5	55 min	62	%
RTFOT-AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO	D 36	8 max	4	grau C
RTFOT - DUCTILIDADE A 25GC	D 113	20 min	85	cm
RTFOT VARIACAO EM % MASSA	D 2872	-0,50 a 0,50	-0,20	%
DUCTILIDADE A 25 GC	D 113	60 min	>100	cm
SOLUBILIDADE NO TRICLOROETILENO	D 2042	99,5 min	99,5	% massa
PONTO DE FULGOR	D 92	235 min	264	grau C
INDICE DE SUSCETIBILIDADE TERMICA	X 018	-1,5 a 0,7	+1,1	N/A
DENSIDADE RELATIVA A 20/4 GRAUS CELSIUS	D 70	Anotar (1)	1,012	N/A
AQUECIMENTO A 177 GC	X 215	NESP (2)	NESP	N/A

Notas:

(1) Ensaio nao faz parte da especificacao. Informacao para fins de faturamento.

(2) NESP = Nao espuma

- Este certificado foi gerado eletronicamente e assinado digitalmente pelo responsável.

Fuente: Planta Asfáltica Tecnoedil S.A. - Caaguazú.

Ilustración 66: Certificado de asfalto modificado tipo1.

GAZPROM
LIMITED LIABILITY COMPANY
GAZPROMNEFT BITUMEN MATERIALS
R&D CENTRE

Russian Federation, 390011, Ryazan, Ryzhskoye shosse 20z
Phone: +7(4912) 24-33-27, Fax: +7(4912) 24-33-27, E-mail: bitum@gazprom-neft.ru
OGRN 1036238002645, INN 6234000600

Certificate of quality № 326
Polimer modified bitumen PMB 40/100-48 (PMB Type 1)
EN 14823:2010

Date of manufacture:	08.08.2020	The products are manufactured under the supervision of the quality management system certified by DQS Holding GmbH in accordance with the requirements of ISO 9001:2015. Certificate of compliance № 01: 193368 GW12, valid until 10.03.2021.	
Date sampling:	08.08.2020		
Date of test:	08-11.08.2020		
Party No.:	338		
Task:	E-2		
Weight:	100 g		

Manufacturer: Limited Liability Company Gazpromneft Ryazan Bitumen Refinery Plant, Russian Federation, 390011, Ryazan, Ryzhskoye shosse 20z
Tests were conducted in the test laboratory of R&D centre Limited Liability Company Gazpromneft Bitumen Materials
Accreditation certificate № RU.HJCC.A1.024, valid from 01 March 2018 to 28 February 2023

No	Characteristic	Unit	Test method	Standard according to Normative documents	Selected Class	Result
1	Penetration at 25 °C	0,1 mm	EN 1426	40-100	5	85
2	Softening Point	°C	EN 1427	≥ 50	5	58
3	Flash point (See speed traction) at 5 °C	200°C	EN 12668 followed by EN 13760	≥ 1	4	3,2
Reference to hardening at 103°C, EN 12607-1						
4	Rebound Penetration	%	EN 1426	≥ 60	II	60
	Softening Point	°C	EN 1427	NR	D	4
	Mass Loss	%	EN 12607-1	≤ 0,5	3	0,20
5	Flash Point	°C	EN ISO 2382	≥ 220	4	204
6	FRAS Smoking Point	°C	EN 12932	± 1E	7	-23
7	Elastic recovery at 25°C	%	EN 12608	≥ 60	5	69
8	Storage stability (Difference in softening point)	°C	EN 14399 EN 1427	NR	0	1
	Storage stability (Difference in penetration)	0,1 mm	EN 13300 EN 1426	NR	0	1

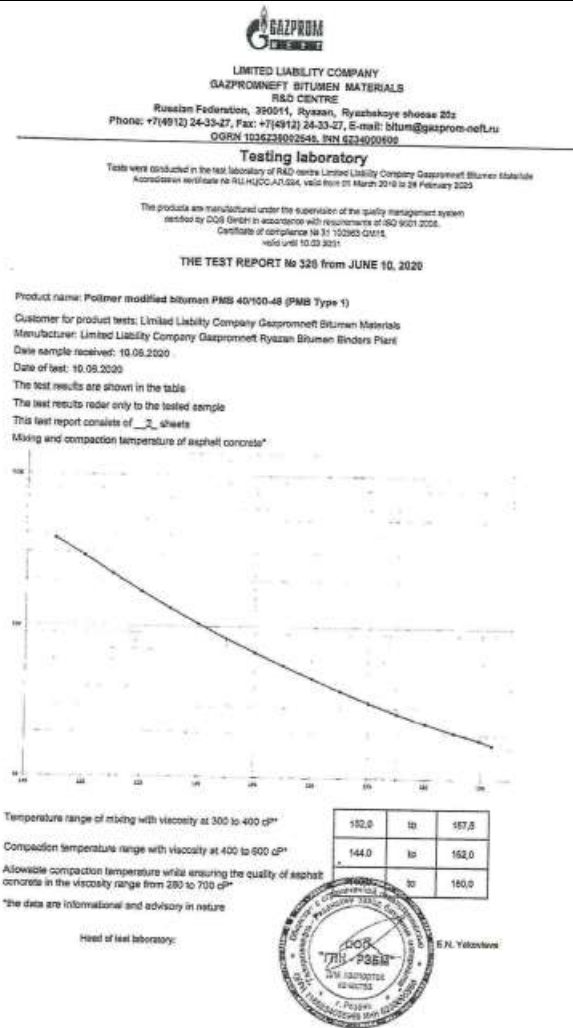
Decision: The product meets the requirements of EN 14823:2010
Sampling according to EN 58
Sample preservation to EN 12504
A storage warranty period – 1 year of the date of manufacturing when stored and transported according to requirements
Mandatory requirements for the preparation of the sample see reverse



E.N. Yekovlev
11.08.2020

Fuente: AIDiaS.A.

Ilustración 67: Rangos de temperatura de mezclado y compactación recomendadas – Asfalto modificado tipo 1.



Fuente: AIDiaS.A.

8.3. Mezclas Asfálticas.

8.3.1. Método rice.

8.3.1.1. CAP MODIFICADO TIPO 1.

Tabla 58: Ensayo rice para mezcla con 3.5, 4, 4.5, 5 y 5.5 (%) de cap modificado tipo 1

		PESO ESPECIFICO EFECTIVO DE LA MEZCLA MÉTODO DE RICE						
Método de ensayo: AASHTO T-209								
Material de:								
Tipo de Mezcla: MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO TIPO 1								
Ensayo N°			1	2	3	4	5	
Muestra N°								
% de CAP			3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	
Peso del picnómetro	<i>a</i>	<i>gr.</i>	2,554.9	2,555.1	2,555.0	2,555.2	2,554.8	
Peso del picnómetro + la muestra	<i>b</i>	<i>gr.</i>	4,681.0	4,593.0	4,605.0	4,635.0	4,621.0	
Peso del picnómetro + la muestra + agua	<i>c</i>	<i>gr.</i>	8,928.6	8,861.6	8,857.2	8,862.8	8,841.6	
Peso del picnómetro + agua	<i>d</i>	<i>gr.</i>	7,585.0	7,585.0	7,585.0	7,585.0	7,585.0	
Temperatura del ensayo	<i>l</i>	<i>°c</i>	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	
Factor de correc. Temp.	<i>k</i>		0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	
Peso de la muestra	$e = b - a$	<i>gr.</i>	2,126.1	2,037.9	2,050.0	2,079.8	2,066.2	
Volumen del agua	$f = c - b$	<i>cm3</i>	4,247.6	4,268.6	4,252.2	4,227.8	4,220.6	
Volumen de la muestra + agua	$g = d - a$	<i>cm3</i>	5,030.1	5,029.9	5,030.0	5,029.8	5,030.2	
Volumen de la muestra	$h = g - f$	<i>cm3</i>	782.5	761.3	777.8	802.0	809.6	
Volumen de muestra correc. Temp.	$m = k * h$	<i>cm3</i>	780.2	759.0	775.5	799.6	807.2	
Peso especifico efectivo de la mezcla	$o = e / m$	<i>gr./m</i>	2.725	2.685	2.644	2.601	2.560	

Fuente: Propia.

Tabla 59: Ensayo rice para mezcla con óptimo de 4.6 (%) de cap modificado tipo 1.

PESO ESPECIFICO EFECTIVO DE LA MEZCLA MÉTODO DE RICE			
Método de ensayo: AASHTO T-209			
Material de:			
Tipo de Mezcla MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO TIPO 1			
Ensayo N°			1
Muestra N°			
% de CAP			4.60
Peso del picnómetro	<i>a</i>	<i>gr.</i>	2,555.3
Peso del picnómetro + la muestra	<i>b</i>	<i>gr.</i>	4,636.0
Peso del picnómetro + la muestra + agua	<i>c</i>	<i>gr.</i>	8,872.6
Peso del picnómetro + agua	<i>d</i>	<i>gr.</i>	7,585.0
Temperatura del ensayo	<i>l</i>	<i>°c</i>	25.4
Factor de correc. Temp.	<i>k</i>		0.997
Peso de la muestra	$e = b - a$	<i>gr.</i>	2,080.7
Volumen del agua	$f = c - b$	<i>cm3</i>	4,236.6
Volumen de la muestra + agua	$g = d - a$	<i>cm3</i>	5,029.7
Volumen de la muestra	$h = g - f$	<i>cm3</i>	793.1
Volumen de muestra correc. Temp.	$m = k * h$	<i>cm3</i>	790.7
Peso especifico efectivo de la mezcla	$o = e / m$	<i>gr./m</i>	2.631

Fuente: Propia.

8.3.1.2. CAP NORMAL 50/70.

Tabla 60: Ensayo rice para mezcla con 3.5, 4, 4.5, 5 y 5.5 (%) de cap normal 50/70.

		PESO ESPECIFICO EFECTIVO DE LA MEZCLA MÉTODO DE RICE					
Método de ensayo: AASHTO T-209							
Material de:							
Tipo de Mezcla MEZCLA ASFALTICA CON CAP NORMAL 50/70.							
Ensayo N°			1	2	3	4	5
Muestra N°							
% de CAP			3.50	4.00	4.50	5.00	5.50
Peso del picnómetro	<i>a</i>	<i>gr.</i>	2,555.2	2,555.4	2,555.8	2,555.1	2,556.0
Peso del picnómetro + la muestra	<i>b</i>	<i>gr.</i>	4,291.0	4,315.5	4,288.0	4,335.3	4,321.2
Peso del picnómetro + la muestra + agua	<i>c</i>	<i>gr.</i>	8,675.8	8,685.3	8,663.2	8,683.2	8,666.0
Peso del picnómetro + agua	<i>d</i>	<i>gr.</i>	7,585.0	7,585.0	7,585.0	7,585.0	7,585.0
Temperatura del ensayo	<i>l</i>	<i>°c</i>	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
Factor de correc. Temp.	<i>k</i>		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Peso de la muestra	$e = b - a$	<i>gr.</i>	1,735.8	1,760.1	1,732.2	1,780.2	1,765.2
Volumen del agua	$f = c - b$	<i>cm3</i>	4,384.8	4,369.8	4,375.2	4,347.9	4,344.8
Volumen de la muestra + agua	$g = d - a$	<i>cm3</i>	5,029.8	5,029.6	5,029.2	5,029.9	5,029.0
Volumen de la muestra	$h = g - f$	<i>cm3</i>	645.0	659.8	654.0	682.0	684.2
Volumen de muestra correc. Temp.	$m = k * h$	<i>cm3</i>	645.0	659.8	654.0	682.0	684.2
Peso especifico efectivo de la mezcla	$o = e / m$	<i>gr./m</i>	2.691	2.668	2.649	2.610	2.580

Fuente: Propia.

Tabla 61: Ensayo rice para mezcla con óptimo de 4.5 (%) de cap normal 50/70.

		PESO ESPECIFICO EFECTIVO DE LA MEZCLA MÉTODO DE RICE				
Método de ensayo: AASHTO T-209						
Material de:						
Tipo de Mezcla MEZCLA ASFALTICA CON CAP NORMAL 50/70.						
Ensayo N°			1			
Muestra N°						
% de CAP			4.50			
Peso del picnómetro	<i>a</i>	<i>gr.</i>	2,553.1			
Peso del picnómetro + la muestra	<i>b</i>	<i>gr.</i>	4,282.0			
Peso del picnómetro + la muestra + agua	<i>c</i>	<i>gr.</i>	8,661.0			
Peso del picnómetro + agua	<i>d</i>	<i>gr.</i>	7,585.0			
Temperatura del ensayo	<i>l</i>	<i>°c</i>	25.0			
Factor de correc. Temp.	<i>k</i>		1.000			
Peso de la muestra	$e = b - a$	<i>gr.</i>	1,728.9			
Volumen del agua	$f = c - b$	<i>cm3</i>	4,379.0			
Volumen de la muestra + agua	$g = d - a$	<i>cm3</i>	5,031.9			
Volumen de la muestra	$h = g - f$	<i>cm3</i>	652.9			
Volumen de muestra correc. Temp.	$m = k * h$	<i>cm3</i>	652.9			
Peso especifico efectivo de la mezcla	$o = e / m$	<i>gr./m</i>	2.648			

Fuente: Propia.

8.3.2. Estabilidad remanente.

