



DISEÑO DE UNA MEZCLA MARSHALL PARA CARPETA DE RODADURA
EMPLEANDO MATERIAL FRESADO PROVENIENTE DE TECNOPAVIMENTOS
S.A. Y COMPARACION CON MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL.

EMILY JOHANA GUERRA RODRÍGUEZ

DANIEL FELIPE PINZÓN NÚÑEZ

DIRECTORA: ING. NORMA CRISTINA SOLARTE V.

TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
2019

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

DISEÑO DE UNA MEZCLA MARSHALL PARA CARPETA DE RODADURA
EMPLEANDO MATERIAL FRESADO PROVENIENTE DE TECNOPAVIMENTOS S.A.
Y COMPARACION CON MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL.

EMILY JOHANA GUERRA RODRÍGUEZ

DANIEL FELIPE PINZÓN NÚÑEZ

DIRECTORA: ING. NORMA CRISTINA SOLARTE V.

TRABAJO DE GRADO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
2019

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

A la hora de recoger frutos después de un camino de siembra y sacrificio, al primero que le debo las gracias es a Dios, quien hace posible mi existencia y quien me otorgó todas las capacidades para lograr lo que hoy en día soy, como persona y como profesional y es por lo que toda la gloria y la honra es para Él.

A mis padres quienes desde el día en que nací, vieron en mí una gran mujer y por lo cual han luchado día a día para que yo pueda cumplir cada una de mis metas, mi madre Rosmery Rodríguez Bredes, quien me ha llenado de valentía y me ha hecho entender que como mujer debo ser fuerte y luchadora y a mi padre Jaime Enrique Guerra Mendoza que me comparte diariamente su sabiduría para que cada día sea una mejor persona y con sus palabras traza un camino en el que la vida se hace más fácil y llevadera.

A mis hermanos, Jeinner Alexander Guerra Rodriguez y Elder Dayan Diaz Rodriguez, quienes han sido un ejemplo de superación, me han demostrado que el que quiere puede y que todo sacrificio tiene su recompensa, a ellos les agradezco por ser ese espejo en la vida que me impulsa a lograr todo aquello que anhela mi corazón.

A Luis Eduardo Franco, quien me llenó de su hermosa humildad y quien me enseña diariamente el verdadero valor de las cosas, el que me ha hecho descubrir virtudes en mí que quizás yo no conocía, quien diariamente me impulsa a cumplir mis sueños y a quien le debo millones de sonrisas y experiencias vividas.

A mi tía Jennie Carrillo Villegas, quien ha sido parte fundamental en mi proceso de crecimiento, para quien soy un ejemplo de vida y quien nunca ha desconfiado de mis capacidades y que con sus palabras siempre ha llenado mi corazón de valor para demostrarle al mundo y a mí misma todo aquello que soy capaz de lograr.

A mi compañero Daniel Felipe Pinzón, quien luchó diariamente conmigo desde el inicio hasta el fin para llegar a donde estamos hoy en día a un paso de la meta.

A la Universidad Pontificia Bolivariana y a todo el equipo de la facultad de ingeniería Civil, por abrirme las puertas y hacer de mí hoy 5 años después una persona totalmente diferente a la que entró, llena de sabiduría y sueños.

A todos aquellos maestros que, en el largo camino del aprendizaje, me aportaron su sabiduría para que hoy en día yo pueda ver este sueño hecho realidad, ser Ingeniera Civil.

A mis amigos y todas aquellas personas que fueron parte de este proceso, quienes me hacían reír diariamente y que sobre todo siempre confiaron en mí, Muchas gracias.

EMILY JOHANA GUERRA RODRIGUEZ

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Principalmente quiero agradecer y dirigir este proyecto a Dios el cual me acompaña en todos los momentos de mi vida, a mi Madre Bárbara Núñez por el amor inculcado para que en cada logro deseado se cumpla, mi padre Jacob Pinzón por la constancia inculcada para que todo los sueños se hagan realidad y en general a mis padres por el sacrificio que hicieron para que yo pudiera sacar esta carrera adelante y por el significado tan grande que tiene para ellos el logro de esta gran meta en mi vida. A mis hermanos Oscar James, Diego Armando y Leidy Diana por su demostración de que si las cosas se sueñas y se trabajan duras por ellas, todo se puede cumplir y que los frutos de un trabajo arduo se ven con la constancia y también por el gran apoyo en este proceso de formación; para toda mi familia, compañeros, amigos y profesores que han aportado un granito de aprendizaje en mi para poder obtener este gran logro en mi vida y de ser un en futuro no muy lejano ingeniero civil.

DANIEL FELIPE PINZON NUÑEZ

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.....	13
2. ABSTRACT.....	14
3. INTRODUCCION	15
4. OBJETIVOS.....	17
4.1 OBJETIVO GENERAL	17
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
5.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	18
5.2 ALCANCE	19
5.3 JUSTIFICACIÓN	20
4. ESTADO DEL ARTE.....	21
5. MARCO TEORICO	25
5.1 PAVIMENTO	25
5.1.1 <i>Materiales</i>	25
5.1.2 <i>Características</i>	25
5.1.3 <i>Tipos de Pavimentos</i>	26
5.2 PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	27
5.2.1 <i>Estructura del pavimento flexible</i>	27
5.2.2 <i>Características</i>	27
5.2.3 <i>Función de cada capa</i>	27
5.2.4 <i>Duración</i>	28
5.3 CARPETA ASFÁLTICA	28
5.3.1 <i>Agregados Pétreos</i>	28
5.3.1.1 Tipos de agregados pétreos.....	28
5.3.1.2 Propiedades.....	29
5.3.2 <i>Cemento asfáltico, asfalto o betún</i>	29
5.3.3 <i>Tipos de carpeta asfáltica</i>	29
5.3.3.1 <i>Carpeta asfáltica de uno, dos o tres riegos</i>	29
5.3.3.2 <i>Carpetas asfálticas mezcladas in situ o en frío</i>	30
5.3.3.3 <i>Carpetas de concreto asfáltico</i>	30
5.4 FALLAS EN LOS PAVIMENTOS FLEXIBLES	31
5.4.1 <i>Falla por insuficiencia estructural</i>	31
5.4.2 <i>Falla por defectos constructivos</i>	31
5.4.3 <i>Falla por fatiga</i>	31
5.5 FALLAS MÁS COMUNES EN LOS PAVIMENTOS.....	31
5.5.1 <i>Agrietamiento en piel de cocodrilo</i>	31
5.5.2 <i>deformación permanente en la superficie del pavimento</i>	32
5.5.3 <i>Fallas por cortante</i>	32
5.5.4 <i>Agrietamiento longitudinal</i>	33
5.5.5 <i>Consolidación del terreno de cimentación</i>	33
5.6 RECICLAJE DE PAVIMENTOS FLEXIBLES	33
5.6.1 <i>Técnicas de reciclado</i>	33
5.6.1.1 <i>Reciclado In Situ en caliente</i>	34
5.6.1.2 <i>Reciclado In Situ en frío con cemento</i>	34
5.6.1.3 <i>Reciclado In Situ en frío con emulsiones bituminosas</i>	34
5.6.1.4 <i>Reciclado en planta</i>	35
6. METODOLOGIA	36
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	36
6.1.1 <i>Extracción de asfalto por medio de la centrifuga</i>	36

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

6.1.2	<i>Análisis granulométrico de los agregados gruesos y agregados finos</i>	37
6.1.3	<i>Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4") por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles</i>	39
6.1.4	<i>Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval</i>	41
6.1.5	<i>Determinación del valor del 10% de finos</i>	42
6.1.6	<i>Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio</i>	44
6.1.7	<i>Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso</i>	46
6.1.8	<i>Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso</i>	48
6.1.9	<i>Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras</i>	49
6.1.10	<i>Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino</i>	51
6.1.11	<i>Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)</i>	52
6.1.12	<i>Equivalente de arena de suelos y agregados finos</i>	54
6.1.13	<i>Determinación del límite líquido de los suelos</i>	56
6.1.14	<i>Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos</i>	57
6.2	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO	59
6.2.1	<i>Ductilidad de los materiales asfálticos</i>	59
6.2.2	<i>Penetración de los materiales bituminosos</i>	60
6.2.3	<i>Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland</i>	61
6.2.4	<i>Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)</i>	62
6.3	DISEÑO MARSHALL	63
6.3.1	<i>Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall</i>	63
6.3.2	<i>Análisis Volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente</i>	66
6.4	VERIFICACIÓN DE LOS DISEÑOS MARSHALL PRELIMINARES.....	67
6.4.1	<i>Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta</i>	68
6.4.2	<i>Resistencia a la Deformación Plástica; Rueda de Hamburgo</i>	69
6.4.3	<i>Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas</i>	71
7.	RESULTADOS	73
7.1	EXTRACCIÓN DE ASFALTO POR MEDIO DE LA CENTRIFUGA	73
7.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS.....	73
7.2.1	<i>Análisis granulométrico de los agregados gruesos y agregados finos</i>	73
7.2.2	<i>Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los ángeles</i>	75
7.2.3	<i>Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval</i>	76
7.2.4	<i>Determinación del valor del 10% de finos</i>	76
7.2.5	<i>Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio</i>	77
7.2.6	<i>Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso</i>	78
7.2.7	<i>Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras</i>	78
7.2.8	<i>Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino</i>	79
7.2.9	<i>Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)</i>	80
7.2.10	<i>Equivalente de arena de suelos y agregados finos</i>	81
7.2.11	<i>Determinación del límite líquido de los suelos y límite plástico e índice de plasticidad de los suelos</i>	81
7.3	CARACTERIZACIÓN DEL ASFALTO.....	81
7.3.1	<i>Ductilidad de los materiales asfálticos</i>	81
7.3.2	<i>Penetración de los materiales bituminosos</i>	82
7.3.4	<i>Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland</i>	82
7.3.5	<i>Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)</i>	82
7.4	FORMULA DE TRABAJO Y DOSIFICACIÓN	83
7.5	DISEÑO MARSHALL CONVENCIONAL MSC-25 Y DISEÑO MARSHALL CON ADICIÓN DE FRESADO MSC-25	85
7.5.1	<i>Cantidades del material</i>	85
7.5.2	<i>Estabilidad y flujo</i>	86

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

7.5.3	<i>GMM y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall convencional y modificado con adición de fresado.</i>	88
7.5.4	<i>Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta</i>	94
7.5.5	<i>Resistencia a la deformación Plástica de las mezclas asfálticas mediante la rueda de Hamburgo</i>	96
7.5.6	<i>Ensayo de tracción indirecta para determinar los módulos resilientes de mezclas asfálticas</i>	97
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	98
8.1	ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL	98
8.2	ADHERENCIA	100
8.3	RUEDA DE HAMBURGO	101
8.4	MÓDULOS RESILIENTES	101
9.	CONCLUSIONES	103
10.	REFERENCIAS	106
11.	ANEXOS	109
11.1	ANEXO 1	109
11.2	ANEXO 2	110
11.3	ANEXO 3	111
11.4	ANEXO 4	113

LISTA DE GRAFICOS

Figura 1. Deformaciones permanentes en la superficie del pavimento.	32
Figura 2 Ensayo para la extracción de asfalto	37
Figura 3 Muestras para Análisis granulométrico	39
Figura 4 Muestra para ensayo Máquina de los ángeles	41
Figura 5 Ensayo máquina de los ángeles	41
Figura 6 Ensayo de Micro-Deval.....	42
Figura 7 Ensayo 10% de finos	44
Figura 8 Ensayo de solidez	46
Figura 9 Ensayo densidad de agregados gruesos.....	48
Figura 10 gravedad específica de finos.....	52
Figura 11 Ensayo de determinación de contenido de vacíos en agregados finos	53
Figura 12 Ensayo equivalente de arena	56
Figura 13 Ensayo límite líquido.....	57
Figura 14 Ensayo ductilidad de materiales asfálticos	60
Figura 15 Ensayo de penetración del asfalto	61
Figura 16 Ensayo de punto de chispa y llama.....	62
Figura 17 Ensayo punto de ablandamiento.....	63
Figura 18 Preparación de material para briquetas.....	64
Figura 19 Mezcla de los agregados y asfalto	65
Figura 20 Briquetas desencofradas y toma de gravedad específica BULK.....	65
Figura 21 Ensayo Marshall	66
Figura 22 Ensayo de GMM.....	67
Figura 23 ejecución del ensayo de adherencia.....	69
Figura 24 Briquetas falladas	69
Figura 25 Briqueta de rueda de Hamburgo.....	70
Figura 26 Ejecución del ensayo rueda de Hamburgo	71
Figura 27 Corte de briquetas para módulos resilientes.....	71
Figura 28 Ejecución del ensayo de módulos resilientes	72

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Porcentaje de pérdidas máquina de los ángeles	75
Ecuación 2 Porcentaje de pérdidas de Micro-Deval	76
Ecuación 3 Fuerza F	76
Ecuación 4 Densidad relativa SH	78
Ecuación 5 Densidad relativa SSS	78
Ecuación 6 Densidad relativa aparente	78
Ecuación 7 % De absorción	78
Ecuación 8 Densidad relativa SH	79
Ecuación 9 Densidad relativa SSS	79
Ecuación 10 Densidad relativa aparente	79
Ecuación 11 % De absorción	79
Ecuación 12 Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar (u)	80
Ecuación 13 Equivalente de arena (EA)	81
Ecuación 14 % de saturación	94
Ecuación 15 Resistencia a la tensión	95
Ecuación 16 RTT, resistencia a la tensión	95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Generación de RAP y utilización en la fábrica de mezclas recicladas de diferentes países de Europa	21
Tabla 2 Tamaño de muestras para análisis granulométrico	38
Tabla 3 Tamaño máximo nominal para la selección de agregado grueso	38
Tabla 4 Granulometrías de las muestras de ensayo	40
Tabla 5 Muestra para el ensayo de Micro-Deval	41
Tabla 6 Masa mínima para el ensayo de 10% de finos.....	42
Tabla 7 Penetración requerida durante el ensayo de 10% de finos.....	43
Tabla 8 Muestra de agregado fino para ensayo de solidez	45
Tabla 9 Muestra de agregado grueso para ensayo de solidez	45
Tabla 10 Masa mínima para densidad del agregado grueso	47
Tabla 11 Muestra para caras fracturadas	48
Tabla 12 Muestra para alargamiento y aplanamiento de los agregados	50
Tabla 13 muestra para contenido de vacíos en agregados finos	53
Tabla 14 Extracción del contenido de asfalto de una mezcla modificada con RAP.....	73
Tabla 15 Granulometría agregado grueso (tolva 1/2).....	73
Tabla 16 Granulometría agregado grueso (tolva 3/4).....	74
Tabla 17 Granulometría agregado fino (tolva fino).....	74
Tabla 18 Granulometría del fresado	75
Tabla 19 Ensayo máquina de los ángeles	76
Tabla 20 Resultados ensayo Micro-Deval (Agregado nuevo- Material fresado)	76
Tabla 21 Resultados ensayo 10% de finos (Agregado nuevo)	77
Tabla 22 Resultados ensayo de gravedad específica material nuevo y material fresado.....	78
Tabla 23 Resultados ensayo alargamiento (Agregado Nuevo).....	78
Tabla 24 Resultados ensayo aplanamiento (agregado nuevo)	79
Tabla 25 Resultados ensayo densidad relativa de finos.....	80
Tabla 26 Resultados ensayo equivalente de arena.....	81
Tabla 27 Resultados del ensayo de ductilidad	81
Tabla 28 Resultado de ensayo de penetración	82
Tabla 29 Resultados de gravedad específica del asfalto.....	82
Tabla 30 Resultados punto de inflamación y de combustión del asfalto.....	82
Tabla 31 Resultados punto de ablandamiento del asfalto	82
Tabla 32 Dosificación de tolvas para formula de trabajo (Agregado nuevo).....	83
Tabla 33 Dosificación de tolvas para formula de trabajo (material fresado).....	83
Tabla 34 Ejemplo de distribución de material para una briqueta de 1200g en diseño Marshall con adición de fresado	85
Tabla 35 Ejemplo de distribución de material para una briqueta de 1200g en diseño Marshall convencional	86
Tabla 36 Pesos (agua, aire, húmedo), Estabilidad, flujo y Gravedad específica de Diseño Marshall Convencional	87
Tabla 37 Pesos (agua, aire, húmedo), Estabilidad, flujo y Gravedad específica de Diseño Marshall Modificado con Adición de fresado.	87
Tabla 38 Resultados Gmm y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall convencional	89

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 39 Resultados Gmm y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall modificado	89
Tabla 40 Resultados Adherencia diseño Marshall convencional	94
Tabla 41 Resultados Adherencia diseño Marshall modificado con adición de fresado	94
Tabla 42 Resultados Adherencia (RT, RRT) diseño Marshall convencional.....	95
Tabla 43 Resultados Adherencia (RT, RRT) diseño Marshall Modificado con adición de fresado.....	95
Tabla 44 Resultados módulos a 5°C	97
Tabla 45 Resultados módulos a 25°C	98
Tabla 46 Resultados módulos a 40°C	98

1. RESUMEN

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO:	DISEÑO DE UNA MEZCLA MARSHALL PARA CARPETA DE RODADURA EMPLEANDO MATERIAL FRESADO PROVENIENTE DE TECNOPAVIMENTOS S.A. Y COMPARACION CON MEZCLA ASFALTICA CONVENCIONAL.
AUTOR(ES):	Emily Johana Guerra Rodriguez Daniel Felipe Pinzon Nuñez
PROGRAMA:	Facultad de Ingeniería Civil
DIRECTOR(A):	Ing. Norma Cristina Solarte Vanegas

RESUMEN

Con el fin de adelantar un proyecto que mitigue la contaminación ambiental generada por el constante crecimiento de la infraestructura vial, se realiza un diseño de mezcla Marshall MSC-25 modificado con adición de fresado proveniente de acopios de Tecnopavimentos S.A.S para compararlo con un diseño de mezcla Marshall MSC-25 Convencional por medio de caracterización de agregados tanto para el fresado como para el material nuevo proveniente de la empresa Sánchez Construcciones LTDA, mediante ensayos mecánicos como lo son el ensayo de estabilidad y flujo, evaluación de la susceptibilidad al agua utilizando la prueba de tracción indirecta, Resistencia a la deformación plástica, y ensayos dinámicos como lo es el modulo resiliente. Los datos obtenidos son comparados y analizados y evidencian la metodología usada durante el proceso. A su vez, se emite un resultado experimental que muestra la viabilidad que podría alcanzar su ejecución.

PALABRAS CLAVE:

Fresado, Mezcla marshall, estabilidad y flujo, Ensayos Mecánicos, Ensayos dinámicos.

Vº Bº DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

2. ABSTRACT

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN OF A MARSHALL MIX FOR ROLLING FOLDER USING MILLED MATERIAL FROM TECNOPAVIMENTOS S.A. AND COMPARISON WITH CONVENTIONAL ASPHALTIC MIXTURE.

AUTHOR(S): Emily Johana Guerra Rodriguez
Daniel Felipe Pinzon Nuñez

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. Norma Cristina Solart Vanegas

ABSTRACT

In order to advance a project that mitigates the environmental pollution generated by the constant growth of the road infrastructure, a modified Marshall MSC-25 mix design is made with refreshments from SAS Tecnopavimentos coupling to compare it with a Marshall MSC mix design. -25 Conventions for the aggregate's characterization medium both for milling and for the new material of the company Sánchez Construcciones LTDA, by means of mechanical tests such as the sound of stability and flow, evaluation of the susceptibility to water with the indirect tensile test, resistance to plastic deformation, and dynamic tests such as the resilient module. The data is compared and analyzed and presented in the process. In turn, an experimental result can be obtained that shows the viability that its execution could achieve.

KEYWORDS:

rap, Stability and Flow, Marshall MSC-25

Vº Bº DIRECTOR OF GRADUATE WORK

3. INTRODUCCION

Hoy día, el medio ambiente y el desarrollo sostenible es el tema principal en las diferentes cumbres que se llevan a cabo en el mundo, debido a que día a día se ve como la tierra se manifiesta ante el mal uso que le da el hombre a los recursos naturales o bienes comunes. La ingeniería civil debe fortalecer su alianza con el medio ambiente, debido a que, por su aplicación en el campo, muchos de los recursos naturales deben ser trasladados o simplemente eliminados, afectando así, muchos ecosistemas.

Como profesionales en esta área, se debe garantizar el desarrollo sostenible, el cual se basa en satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para suplir las suyas.

Una de las muchas necesidades que se presentan en la sociedad hoy en día, es la de comunicación y transporte, debido a que diariamente las personas deben trasladarse de un lugar a otro con un fin, el cual puede ser trabajo, estudio, ocio, transportar alimentos, mercancía o simplemente para ir a un buen lugar de vacaciones y una de las muchas ramas que estudia la ingeniería civil como lo es la ingeniería de vías, suelos y pavimentos suple dicha necesidad.

En este proyecto de grado, se quiere lograr un enfoque en las vías de nuestro país y del impacto que ellas producen. Una estructura de pavimento flexible está conformada por varias capas granulares y una carpeta asfáltica la cual está compuesta por agregado fino, grueso y un ligante llamado Asfalto o betún, proveniente del petróleo.

El parque automotor en Colombia al inicio del año 2018 rondaba entre los 13.6 millones de vehículos los cuales cuentan con una malla vial de ciudades principales que se conectan a la red nacional de carreteras (Zona, 2018). El uso diario y constante de estas redes viales ocasionan un deterioro inminente y es por lo que las capas superficiales de los pavimentos necesitan mantenimiento constante. En este mantenimiento, se extrae de la capa superior un material llamado RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) el cual, en muchas ocasiones es

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP desechado o simplemente apilado en las plantas de pavimentos del país que, en este caso es TECNOPAVIMENTOS S.A. la cual cuenta con un banco de pavimento asfáltico reciclado sin uso alguno, lo que causa una carga ambiental, que, si no tiene provecho, se convertiría en contaminación.

Lo que se quiere realizar en este proyecto, es reciclar este material e implementarlo en un diseño de mezcla semidensa en caliente MSC-25 y finalmente evaluar su comportamiento frente a un diseño convencional, en el cual, si se encuentran resultados satisfactorios, se le brindaría a la sociedad una solución para dicha problemática y contribuiríamos como ingenieros civiles de formas positiva al medio ambiente.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Diseñar y elaborar una mezcla asfáltica, empleando pavimento asfáltico reciclado (RAP) que cumpla con las especificaciones técnicas de construcción del Instituto Nacional de Vías, INVIAS.

4.2 Objetivos específicos

- Realizar un diseño de mezcla asfáltica semidensa MSC-25 con inclusión de material fresado (RAP) y un diseño de mezcla asfáltica semidensa MSC-25 convencional.
- Verificar el diseño Marshall de las Mezclas con la medición del efecto del agua en tracción indirecta, deformación plástica, módulo resiliente y/o leyes de fatiga.
- Comparar el comportamiento de la mezcla asfáltica con adición de material fresado y mezcla asfáltica convencional.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

5.1 Definición del problema

El material fresado o RAP (por sus siglas en inglés: Recycled Asphalt Paviment) es un material, compuesto por asfalto y agregados, que ha sido removido o procesado de pavimentos existentes debido a su deterioro en su vida útil (Burgos, 2015). Para obtener el material se puede utilizar una fresadora, la cual remueve capas de hasta 5 centímetros o una excavadora que puede romper capas asfálticas completas.

El RAP es un material que se extrae a la hora de realizar mantenimientos en una malla vial y teóricamente, en las normas no tienen ningún uso después de ser extraído, muchas personas lo usan para pavimentar vías terciarias de veredas o pueblos, sin embargo, tiene propiedades que pueden ser mucho más útiles si se decide reciclar. En muchos casos, como el que se presenta en este proyecto, muchas plantas de pavimentos apilan dicho material sin sacarle provecho alguno, lo cual genera un impacto negativo a largo plazo, ya que, llegara un momento en el que no tendrá cabida y se puede decir que se desconoce la forma en la que lo van a desechar, lo que sí es una realidad, es que cual sea el método que usen causara un impacto ambiental casi que irreversible, debido a que dicho material contiene asfalto y este es altamente contaminante.

5.2 Alcance

Hoy en día es importante para el medio ambiente reutilizar materiales de estructuras que por su tiempo de vida útil no es recomendable que sigan en uso, el objetivo principal de este proyecto de grado es tomar el material fresado (RAP) que se encuentra aislado en grandes cantidades en empresas dedicadas a la construcción de pavimentos en Santander (TECNOPAVIMENTOS S.A.), caracterizarlo y elaborar un diseño de mezcla asfáltica que cumpla con las especificaciones técnicas de construcción del Instituto Nacional de Vías, INVIAS, verificar este diseño y así poder compararlo con un diseño de mezcla Marshall convencional.

5.3 Justificación

El reciclado de pavimentos flexibles es una técnica viable y económica para el mejoramiento y mantenimiento de las carreteras colombianas, ya que hace posible reutilizar los materiales que se encuentran dispuestos en nuestras carreteras, una vez han cumplido con la vida útil, lo que representa economía en el mantenimiento y rehabilitación de los pavimentos en servicio, conservando así el patrimonio vial (Angel , 2010).

Es importante recalcar que en la actualidad toda iniciativa que contribuya a la mejoría de la situación ambiental es un gran paso, ya que se aporta desde lo individual y poco a poco más personas se unen a esta causa, además, esto no solo favorece al medio ambiente, si el diseño modificado con material fresado muestra un resultado favorable frente a un diseño totalmente nuevo o exento de fatiga sería viable para la industria de la construcción de pavimentos, porque disminuirían los costos de materia prima, el consumo de cemento asfáltico y materiales pétreos y el uso de material fresado que se encuentra desechado en las plantas pavimentaras de Santander, además de darle un valor comercial, ya que en la actualidad no lo tiene.

Cuando se ven beneficiados varios sectores, la economía de un país crece y uno de los objetivos más grandes que tienen los jóvenes profesionales hoy en día, es hacer de Colombia un país desarrollado y sostenible, porque todo aquello que brinde calidad de vida aporta a un crecimiento personal y social.

4. ESTADO DEL ARTE

La utilización del reciclado de pavimento es un método que se conoce en el mundo desde 1917 aproximadamente, puesto en práctica por Estados Unidos hacia la década de los setenta. Después se fue popularizando, debido a las grandes ventajas tanto económicas como ambientales, siendo actualmente utilizado en varios países alrededor del mundo como Canadá, Alemania, Australia, Holanda, Dinamarca, Brasil, España, entre otros países, utilizando grandes producciones de reciclado de pavimentos las cuales en su mayoría se encuentran en acopios dentro de las plantas de pavimentos a nivel mundial (Buitrago Zarabanda, 2016). A continuación, se muestra en la tabla 1, la generación de RAP y la utilización de este en la fabricación de mezclas recicladas en diferentes países.

Tabla 1 *Generación de RAP y utilización en la fábrica de mezclas recicladas de diferentes países de Europa*

PAIS	TODO EL ASFALTO REUTILIZABLE DISPONIBLE EN 2017 EN TONELADAS	% USADO DE ASFALTO REUTILIZABLE						AREA APLICADA EN M2 DE REUTILIZACION DE MATERIAL ASFALTICO EN CALIENTE IN SITU/EN LA CARRETERA (REMEXCLA, REPAVIMENTACION, REMODELACION, ETC)	LA CANTIDAD DE SOLO MATERIAL DE ASFALTO RECALENTADO REICLADO IN SITU/EN LA CARRETERA (REMEXCLA, REPAVIMENTACION, REMODELACION, ETC) EN TONELADAS METRICAS
		PRODUCCION DE MEZCLA DE ASFALTO EN CALIENTE	PRODUCCION DE MEZCLA DE ASFALTO A MEDIO CALOR	PRODUCCION DE MEZCLA DE ASFALTO EN FRIO	CARRETERAS SIN CAPAS	OTRAS APLICACIONES EN LA INGENIERIA CIVIL	PONER DE RELLENO/OTRAS APLICACIONES/DESCONOCIDO		
Austria	1.650.000	60	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
Bélgica	1.030	95	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
Republica checa	12.600.000	14	0	30	20	10	26	381.280	418.000
Dinamarca	1.165.000	66	0	0	8	0	26	sin datos	sin datos
Finlandia	1.200.000	100	0	0	0	0	0	12.000.000	sin datos
Francia	6.400.000	70	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	1.097.614	197.478
Alemania	13.000.000	84	0	0	16	0	0	sin datos	sin datos
Gran Bretaña	3.400.000	90	90	90	0	0	0	sin datos	sin datos
Hungría	120.000	95	0	0	0	4	1	sin datos	sin datos
Italia	9.000.000	23	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos	sin datos
Países Bajos	4.500.000	71	0	11	0	0	18	sin datos	sin datos

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Noruega	1.101.000	30	0	1	69	0	0	sin datos	sin datos
Eslovaquia	50.000	96	0	2	1	1	0	130.000	16.000
Eslovenia	84.000	24	0	6	10	0	60	sin datos	sin datos
España	494.000	83	0	0	14	0	3	sin datos	sin datos
Pavo	2.570.589	9	0	6	85	0	0	sin datos	sin datos
USA	72.500.000	96	0	0	4	0	0	sin datos	sin datos

Nota. Fuente: de European Asphalt Pavement Association (EAPA, 2017)

En la *Tabla 1* Generación de RAP y utilización en la fábrica de mezclas recicladas de diferentes países de Europa, se observa que la cantidad de pavimento asfáltico reciclado que se reutiliza en estos países tiene un porcentaje muy mínimo frente a la cantidad que hay en toneladas, esto nos indica que aún falta mucho para lograr convencer a la industria de pavimentos para su implementación, aunque, cabe resaltar, que, aunque sea poco, es importante que ya se esté tomando la iniciativa desde hace muchos años.

A lo largo del tiempo se han realizado varias investigaciones relacionadas con el pavimento asfáltico reciclado en Colombia y varios países del mundo. Tal es el caso de la Universidad Politécnica de Cataluña quienes en su investigación pretendían ampliar la experiencia y el conocimiento sobre el comportamiento de las mezclas recicladas, a través del análisis del comportamiento estructural de firmes que incorporan este tipo de mezclas, cuyo objetivo principal era el de mejorar los materiales, el diseño y las técnicas de construcción para la rehabilitación de firmes utilizando mezclas recicladas, tomando como muestra o tramo el proyecto europeo PARAMIX. (Centeno Ortiz , 2007)

En Chile, se encontró con el caso de la Pontificia Universidad Católica de Chile quienes en el volumen séptimo de la revista de la construcción publicaron un artículo en donde se muestra el proceso de caracterización y determinación de las propiedades del material asfáltico reciclable (RAP), y de las mezclas asfálticas en caliente con altas tasas de RAP en su composición. Se seleccionaron proyectos los cuales hayan sido desarrollados con la inclusión de material RAP, y se evaluó la variabilidad existente en los acopios de acuerdo con el contenido de ligante y granulometría. Por otro lado, se evaluaron las propiedades

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP volumétricas y mecánicas obtenidas en los ensayos de Marshall, realizados al control de las mezclas. Lo anterior, logra resultados con mayor variabilidad granulométrica y de contenido asfáltico en las mezclas con altos contenidos de RAP respecto a las mezclas convencionales (Valdez, Gonzalo, & Martinez R, 2008)

En Colombia se encontraron casos, tal como el de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá, donde su objetivo principal de esta investigación fue establecer el comportamiento a fatiga de mezclas asfálticas con granulometrías INVIAS, y MDC 19, con adición del RAP con asfaltos de penetración 60/70 y 80/100. Donde primero se caracterizó el RAP para calcular el porcentaje óptimo de asfalto, y adicionar a mezclas con RAP del 100%. Después se fabricaron probetas con diferentes granulometrías para finalmente poder ser ensayadas a fatiga en diferentes deformaciones (Zuñiga , 2016). Además, también se llevó a cabo una evaluación técnica y económica del uso de pavimento asfáltico reciclado (Rap) En Vías Colombianas en el cual se utilizaron muestras de RAP que ya cumplieron su vida útil al cual se le hizo la respectiva caracterización del asfalto y los agregados recuperados. Como se hizo la caracterización de varias muestras, se descartaron los que tenían viscosidades mayores a 150.000 lo que indica un grado alto de envejecimiento y se tomó como muestra final el que provenía de la vía Buga-Tuluá en el cual se utilizó un 40% de RAP. En los diseños se combinaron los agregados vírgenes con los agregados del RAP de tal forma que se cumpliera con la curva granulométrica correspondiente al promedio de la especificación MOPT 1970 para concretos asfálticos de gradación cerrada con tamaño máximo igual al 3/4". (Mendez Revollo, 2015).

Así mismo la Universidad Distrital Francisco José de Paula se unió a la causa. En esa investigación, se realizó la caracterización del RAP encontrado en la ciudad de Bogotá, se identificaron sus propiedades y se establecieron las principales variaciones que se presentan entre diferentes muestras. Posterior a ello, se identificó la influencia del contenido y grado de

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP envejecimiento del asfalto presente en el material reciclado. Se tomaron 3 muestras diferentes de RAP, de 3 acopios diferentes y se caracterizó y se diseñó una mezcla optima MDC-19 por el método de Marshall, elaborando mezclas con adición del RAP, simulado en diferentes porcentajes. Los resultados de este trabajo sirvieron como guía para poder elegir las proporciones adecuadas de materiales nuevos y reciclados (Buitrago Zarabanda, 2016).

En la universidad de los Andes, una de las mejores y más prestigiosas universidades de Colombia, realizo un diagnóstico sobre el empleo de material asfáltico reciclado en la ciudad de Bogotá, estudiando la variabilidad del material que se encuentra en los centros de acopios autorizados para poder iniciar los trabajos de laboratorios que permitan empezar la correcta caracterización del material y para tener como resultado la determinación de las diferencias y similitudes de manejo de los materiales entre una empresa privada que emplea el material en la ciudad y el Instituto de Desarrollo Urbano. (Buitrago Zarabanda, 2016)

5. MARCO TEORICO

5.1 Pavimento

Se llama pavimento al conjunto de capas de material seleccionado que reciben en forma directa las cargas del tránsito y las transmiten a los estratos inferiores en forma disipada, proporcionando una superficie de rodamiento, la cual debe funcionar eficientemente. Deberá presentar una resistencia adecuada a los esfuerzos destructivos del tránsito, de la intemperie y del agua. Debe tener una adecuada visibilidad y contar con un paisaje agradable para no provocar fatigas. (Anonimo, EcuRed, 2014)

5.1.1 Materiales

Los materiales más comunes que se observan en la construcción de un pavimento son el hormigón y las mezclas asfálticas, ya que su capacidad de soporte permite el paso de los vehículos sin que sus cargas causen tanto daño. Es importante que toda planta fabricante de pavimentos tenga en cuenta que su producto debe ser sostenible y principalmente no contaminante. (Anonimo, PAVIMENTOS , 2009)

5.1.2 Características

El pavimento debe cumplir con una serie de características para que su uso sea seguro y le proporcione a los usuarios comodidad, por lo tanto, debe poseer anchura, trazo vertical y horizontal y en cuanto a sus propiedades mecánicas, debe resistir todas las cargas que los vehículos le proporcionen con el fin de evitar agrietamientos y posibles fallas. En condiciones de humedad, el pavimento debe garantizar una adherencia entre él y el vehículo. La

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP naturaleza proporciona esfuerzos destructivos tales como el agua y la intemperie y es por lo que también debe estar diseñado para resistirlos.

En cuanto al grosor de las capas influye de manera relevante el factor económico, ya que, cuando se determina un grosor, este debe ser el mínimo para que reduzca los esfuerzos de la capa inmediatamente inferior y en cuanto a su resistencia, las variables más importantes son la humedad y el nivel de compactación. (Giordani & Leone, 2012)

5.1.3 Tipos de Pavimentos

En la actualidad nos encontramos con tres tipos de pavimentos, los cuales presentan diferentes características, pero su uso tiene el mismo fin, proveer una vía cómoda y segura.

Estos son:

- **Pavimento Flexible:** Son aquellos pavimentos construidos con materiales granulares y ligados con asfalto (derivado del petróleo) suele ser el más común debido a su bajo costo, pero su desventaja es que necesita un mantenimiento constante, debido a que su vida útil oscila entre 10 a 15 años.
- **Pavimento Rígido:** En un pavimento construido con materiales granulares y concreto de cemento portland generalmente. Su costo de construcción es mucho más elevado frente al pavimento flexible, pero este se ve recompensado en que el pavimento rígido no necesita mantenimiento constante, su vida útil es más larga ya que oscila entre 20 y 40 años y a la hora de realizar reparaciones, estas se hacen normalmente en las juntas de las losas.
- **Otros:** se encuentran además otros tipos de pavimentos para niveles de tránsito bajo, en los que encontramos adoquines, empedrados y placa huella.

5.2 Pavimentos Flexibles

5.2.1 Estructura del pavimento flexible

El pavimento flexible se encuentra conformado por varias capas granulares y una carpeta asfáltica, entre ellas están subrasante, subbase, base y por ultimo la carpeta asfáltica.

5.2.2 Características

Los pavimentos flexibles se caracterizan principalmente por tener una capa superficial bituminosa que a su vez se apoya en capas inferiores llamadas base, subbase y una subrasante la cual representa el terreno natural, dependiendo del requerimiento de cada obra se puede prescindir de ellas.

Cada capa recibe las cargas por encima, se extiende sobre ella y pasa a la siguiente, lo que quiere decir que la última capa recibe menos carga, esto nos lleva a deducir que estas se construyen en un orden descendente siendo la capa superior la más resistente. (Giordani & Leone, 2012)

5.2.3 Función de cada capa

- Carpeta asfáltica o capa de rodadura: Es la capa superficial de la estructura, debe proveer seguridad y comodidad al tránsito vehicular. Como esta capa es la que se encuentra en contacto con los vehículos, debe tener mayor resistencia que las capas inferiores, además, debe ser impermeable, pues es la que entra en contacto directo con el agua.
- Base: Esta capa recibe directamente los esfuerzos que transmite la capa de rodadura y debe estar en condiciones para distribuirla correctamente a la capa inferior.
- Subbase: Esta capa, además de ser la que transmite las cargas a la subrasante, debe trabajar como impedimento para que los finos no descendan y así mismo prevenir la

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP ascensión capilar. Su implementación no conlleva grandes costos, tiene la ventaja de ser económica, debido a que, sus materiales se consiguen fácilmente y en grandes cantidades.

5.2.4 Duración

En la etapa de diseño, un pavimento flexible debe estar en condiciones para trabajar mínimo ocho años antes de sobreponer otra capa, aunque la duración optima debería rondar entre los 20 años.

5.3 Carpeta asfáltica

La carpeta asfáltica es una capa generalmente compuesta por agregados pétreos y cementado con asfalto que y se coloca sobre la base

5.3.1 Agregados Pétreos

Los agregados pétreos son materiales solidos e inertes que se emplean en la construcción de firmes en carreteras y deben cumplir con una granulometría específica dependiendo de la norma de cada país. Se emplean para la construcción de productos artificiales resistentes mediante su mezcla con ligantes de activación hidráulica tales como cementos, cales o con ligantes asfálticos para el caso de una construcción de carretera. (Giordani & Leone, 2012)

5.3.1.1 Tipos de agregados pétreos

El tipo de agregado se determina de acuerdo con su procedencia y a su implementación y se clasifican de la siguiente manera:

- **Agregados Naturales:** Son aquellos que se utilizan después de haber sufrido una modificación en su distribución de tamaño según la exigencia de su disposición final.
- **Agregados de trituración:** Son aquellos agregados que se obtienen al triturar rocas de canteras o del aprovechamiento de las granulometrías de rechazo del agregado natural.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

- Agregados artificiales: son productos reciclados de desechos industriales o producto de demoliciones que pueden ser reutilizables
- Agregados marginales: son aquellos que no cumplen con ninguna especificación en las normas vigentes.

5.3.1.2 Propiedades

Las propiedades de los agregados pétreos deben considerarse de dos formas, como componentes individuales o en grupo

- Propiedades individuales: como elementos aislados tienen propiedades físicas tales como: dimensión, forma, redondez, densidad, porosidad, permeabilidad, entre otros, además de, presentar propiedades químicas como solubilidad, alterabilidad, hinchamiento, etc.
- Propiedades de grupo: en cuanto a las propiedades de conjunto, la distribución de la redondez es una de las características más llamativas ya que esta influye en el rozamiento de los agregados (Giordani & Leone, 2012)

5.3.2 Cemento asfáltico, asfalto o betún

El cemento asfáltico o betún, es el último residuo que queda cuando se le hace el proceso de destilación al petróleo, en temperaturas normales lo encontramos en estado sólido, quebradizo e insoluble en agua, con un color entre negro y café oscuro. Tiene muchos usos tales como revestimiento e impermeabilizar techados y cubiertas pero su uso más común es en la construcción de pavimentos y para poder mezclarlo con los agregados pétreos debe encontrarse a una temperatura de 140°C. (Anónimo, Materiales asfálticos, Aditivos y Mezclas, 2007)

5.3.3 Tipos de carpeta asfáltica

5.3.3.1 Carpeta asfáltica de uno, dos o tres riegos:

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

- Carpeta asfáltica de un solo riego: Son aquellas carpetas donde ya teniendo una base impregnada se deben colocar una serie de capas sucesivamente teniendo en cuenta que los agregados pétreos a utilizar deben tener una granulometría uniforme. Esta carpeta es aconsejable para un tránsito inferior a los 200 vehículos por día
- Carpeta asfáltica de dos riegos: para esta capa, el procedimiento se debe llevar a cabo dos veces donde primero se hace un riego del producto asfáltico y después de los materiales pétreos a diferentes razones respectivamente. Para la segunda capa se debe esperar de dos a tres días y esta carpeta es aconsejable para tránsitos inferiores a 600 vehículos por día.
- Carpeta asfáltica de tres riegos: para esta capa, el procedimiento es similar al de la carpeta de dos riegos, siendo la diferencia, las razones en las que se vierten los agregados pétreos y el producto asfáltico y entre capa se aconseja esperar de dos a tres días. Esta carpeta debe tener la capacidad de resistir hasta 1000 vehículos por día. (Giordani & Leone, 2012)

5.3.3.2 Carpetas asfálticas mezcladas in situ o en frío

Como su nombre lo dice, estas carpetas se realizan con los agregados pétreos a temperatura ambiente y se mezclan con moto conformadoras, la granulometría de este debe ser continua y para el asfalto generalmente se usan rebajados asfálticos o emulsiones de rompimiento medio.

5.3.3.3 Carpetas de concreto asfáltico

Esta carpeta se trabaja con altas temperaturas, el asfalto y el agregado pétreo deben ser calentado a 140°C y 160°C respectivamente. Se debe impregnar la base donde se construirá la carpeta debido a que de no hacerlo o si se construye en un terreno natural con módulos de elasticidad bajos, no trabajará de forma adecuada, se deformará ante las cargas de tránsito, la resistencia no será la deseada y sufrirá una ruptura frágil.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

5.4 Fallas en los pavimentos flexibles

En pavimentos, la palabra falla se utiliza tanto para verdaderos colapsos como deterioros simples y a su vez se aparta de lo que alguna vez se consideró perfecto. Las fallas de los pavimentos se dividen en tres grupos

5.4.1 Falla por insuficiencia estructural

Esta falla se produce por la combinación de la resistencia al esfuerzo cortante de cada capa y sus espesores, se puede dar cuando se usan materiales inapropiados en cuanto a resistencia o pueden ser de buena calidad, pero sus espesores son insuficientes. (Anonimo, Materiales asfálticos, Aditivos y Mezclas, 2007)

5.4.2 Falla por defectos constructivos

Por lo general, este tipo de fallas se producen porque, aunque se manejen materiales de buena calidad, en su construcción se cometen errores. (Burgos, 2015).

5.4.3 Falla por fatiga

Por lo general, estas fallas se manifiestan por la continua repetición de cargas que recibe el pavimento en el transcurso de su vida útil, sufren efectos de fatiga, degradación estructural, pérdida de resistencia y acumulan deformaciones. De aquí, se desprenden tres nuevos grupos que son por fracturamiento, por deformación y por desintegración y se relacionan con el efecto del tránsito, las características y la estructuración del pavimento. (Burgos, 2015)

5.5 Fallas más comunes en los pavimentos

5.5.1 Agrietamiento en piel de cocodrilo

Esta falla se da por el movimiento excesivo de una o más capas del pavimento o por fatiga de la carpeta, se manifiesta como un agrietamiento que se extiende en toda la superficie de superficie de rodamiento, es típico de bases débiles o insuficientemente compactadas (Corredor & Corros , 2010).

5.5.2 deformación permanente en la superficie del pavimento

esta falla está asociada a cargas excesivas, repetidas o rotura de granos que reciben la base y la subbase, las cuales por su capacidad no pueden responder y también se pueden dar por consolidación en la subrasante cuando el ancho del surco es superior a la de la llanta. En la figura 1, se muestra un resumen de cómo la carga de las llantas afecta a los pavimentos.

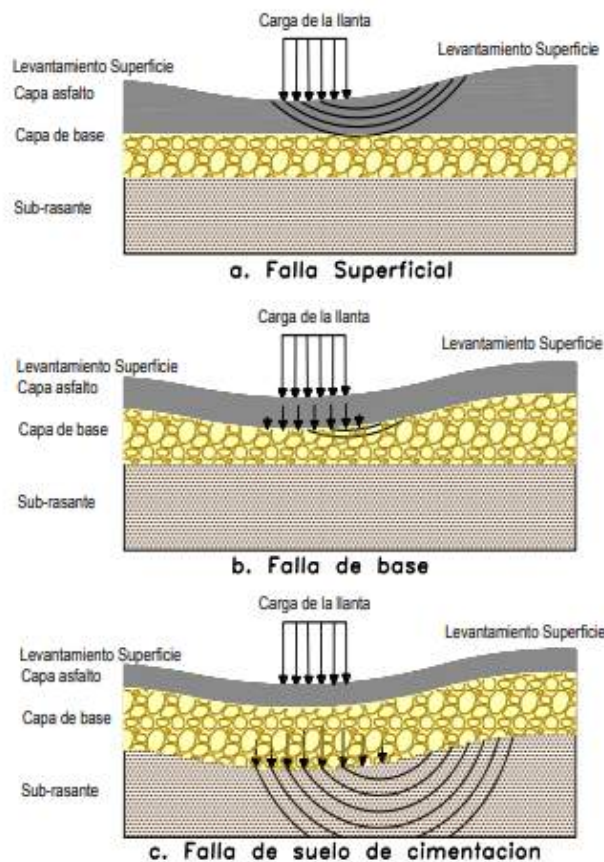


Figura 1. Deformaciones permanentes en la superficie del pavimento.

Fuente: *Evaluación de pavimentos*, Universidad Nacional de Ingeniería, agosto, 2010;

<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/fallas-en-pavimentos1.pdf>

5.5.3 Fallas por cortante

Generalmente se manifiesta como surcos profundos y bien marcados y esto se debe por la falta de resistencia al esfuerzo cortante de la base y la subbase. En la figura 4, se evidencia la falla por cortante en la superficie de un pavimento.

5.5.4 Agrietamiento longitudinal

Se debe a movimientos en las capas del pavimento en dirección horizontal y esto se da en la base, subbase y regularmente en la subrasante.

5.5.5 Consolidación del terreno de cimentación

Esta falla produce distorsión del pavimento independientemente de los espesores o de su condición estructural. Se producen agrietamientos longitudinales o con trayectoria circular.

5.6 Reciclaje de pavimentos flexibles

El envejecimiento natural de los materiales que componen el pavimento y la continua acción del tráfico hace que paulatinamente se vaya deteriorando, disminuyendo así, la comodidad y la seguridad de este, obligando a los entes encargados a realizar mantenimientos para su conservación.

Actualmente, conservar la red vial en buen estado es de suma importancia en todo el mundo debido a todo lo que representa económicamente y a todas las necesidades que le suple al ser humano y al ser tan elevados los costos del mantenimiento, se intensifica la necesidad de la técnica de reciclado de pavimentos, ya que, además de bajar los costos también disminuye aporta a la problemática ambiental.

El fresado y reutilización de conglomerado asfáltico, comporta un gran ahorro ya que requiere de un 1% a 3% de betún adicional, mientras que un nuevo concreto asfáltico puede necesitar un 6%. (Anónimo, Materiales asfálticos, Aditivos y Mezclas, 2007)

5.6.1 Técnicas de reciclado

Este tipo de métodos se basan en la reutilización de los materiales del firme defectuoso. Junto con estos materiales envejecidos, se pueden añadir otros elementos (agentes rejuvenecedores, nueva mezcla bituminosa, etc.). Estas técnicas se pueden dividir en varios tipos diferentes, que exponemos brevemente a continuación:

5.6.1.1 Reciclado In Situ en caliente

En esta técnica se reutiliza el 100% de los materiales extraídos aportándoles calor en el mismo lugar de donde fue retirado. El pavimento se calienta mediante unos quemadores y se fresa con un grosor determinado. Este material es mezclado nuevamente con agentes químicos rejuvenecedores y con nueva mezcla para luego ser extendido y compactado con procedimientos convencionales

5.6.1.2 Reciclado In Situ en frío con cemento

Este es un procedimiento que se basa en el fresado en frío de un cierto grosor del pavimento envejecido y el mezclado de este material con un conglomerante hidráulico (cemento normalmente). El nuevo material se extiende y se compacta definiendo una sólida base para posteriores refuerzos. (Burgos, 2015)

5.6.1.3 Reciclado In Situ en frío con emulsiones bituminosas

Esta técnica permite reutilizar la totalidad de los materiales extraídos del firme envejecido en condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales muy favorables. El procedimiento usual y básico consiste fundamentalmente en las siguientes operaciones:

- Fresado en frío de un cierto grosor del firme
- Mezclado del material obtenido con una proporción determinada de emulsión y otros aditivos
- Extensión en obra de la nueva mezcla
- Compactación energética
- Curado de la capa reciclada
- Extensión de una capa delgada de rodadura a base de mezcla en caliente.

5.6.1.4 Reciclado en planta

Este procedimiento permite reciclar el conjunto o sólo una cierta proporción de material envejecido mediante una central asfáltica adaptada. Al ser el porcentaje de material envejecido relativamente bajo, esta metodología permite corregir problemas graves de dosificación o calidad de los materiales. Dadas todas las técnicas de conservación posibles, debe hacerse un análisis de cada una de ellas teniendo en cuenta todos los condicionantes que las puedan afectar. Algunos de los más importantes serían (Burgos, 2015)

- Coste: Cada técnica tendrá un cierto coste que hay que tratar de minimizar. El coste se puede considerar en términos económicos, sociales y medioambientales.
- Experiencia: La empresa y los técnicos pueden tener más experiencia con una técnica que, con otra, con lo que las garantías de éxito son diferentes en cada caso.
- Equipos disponibles: La empresa debe tener disponibles los equipos humanos y materiales necesarios para poder utilizar una determinada técnica.
- Tiempo requerido de ejecución: El tiempo de entrega de la obra acabada puede ser determinante a la hora de elegir una técnica de conservación.

6. METODOLOGIA

6.1 Caracterización de los agregados

Para la caracterización de los agregados, no encontramos con diferentes ensayos aplicables a los agregados finos y para los agregados gruesos. A los agregados gruesos se le realizan ensayos tales como desgaste de la máquina de los ángeles, degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, resistencia mecánica por el método de 10% de finos, pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, impurezas del agregado grueso y partículas planas y alargadas mientras que al agregado fino se le realizan ensayos de índice de plasticidad, equivalente de arena y angularidad de la fracción fina.

6.1.1 Extracción de asfalto por medio de la centrifuga

Debido a que el objetivo de este proyecto es determinar cómo trabaja el RAP tanto cuantitativa como cualitativamente en una mezcla de diseño convencional, lo primero que debemos hacer es extraer las partículas del agregado fino y grueso que se encuentran en él, para así, lograr la caracterización de los agregados que lo componen.

Este ensayo se le realizó al material fresado proveniente de Tecnopavimentos para así determinar de manera preliminar el contenido de asfalto que traía el material a utilizar en el diseño Marshall modificado con adición de fresado.

Para esto, se escogieron tres muestras de dos mil gramos cada una. Se ubicaron en un horno a temperatura de 60°C y posterior a esto se ubicaron en la máquina centrífuga y se le adiciono gasolina hasta no observar material. En la siguiente imagen se evidencia el proceso de extracción de asfalto, por medio de la centrífuga. (INVE-732, 2013)



Figura 2 Ensayo para la extracción de asfalto
Fuente: propia

El ensayo inicio cuando la maquina centrifuga tuviera un filtro, una tapa con arandela y encima de ella una tapa de seguridad. El ensayo se detiene cuando por medio de una manguera que expulsa el asfalto con la gasolina se observa que no sale más de este líquido y se repitió este proceso 3 veces más por cada muestra ensayada.

El material retirado de la centrifuga se dejó veinte minutos a temperatura ambiente para la evaporación de la gasolina aun presente en la muestra y posterior a esto se lleva a un horno a temperatura de 110°C.

Se retiraron las muestras del horno y se tomaron sus respectivos pesos para determinar el porcentaje de asfalto de cada muestra.

6.1.2 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y agregados finos

El ensayo de análisis granulométrico se hace con el fin de determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados grueso y fino por medio de tamizado. (INVE-213, 2013) La muestra se debe obtener según lo que rige la norma (INVE-201, 2013) Como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2 *Tamaño de muestras para análisis granulométrico*

TAMAÑO DEL AGREGADO	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE CAMPO (Kg)	VOLUMEN DE LA MUESTRA DE CAMPO LITRO (GAL)
Agregado fino		
2,36 mm (No.8)	10(22)	8(2)
4,75 mm (No,4)	10(22)	8(2)
Agregado grueso		
9,5 mm (3/8")	10(22)	8(2)
12,5 mm (1/2")	15(35)	12(3)
19 mm (3/4")	25(55)	20(5)
25 mm (1")	50(110)	40(10)
37,5 mm (1 1/2")	75(165)	60(15)
50 mm (2")	100(250)	80(21)
63 mm (2 1/2")	125(275)	100(26)
75 mm (3")	150(330)	120(32)
90 mm (3 1/2")	175 (385)	140(37)

Nota: Fuente Norma INV E 213-13

Después de ser tomada la muestra, se deja en el horno 24 horas hasta masa constante y al ser secada, el agregado fino debe cumplir con una masa mínima para el análisis de 300 g y para el agregado grueso se escoge dependiendo del tamaño máximo nominal como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 3 *Tamaño máximo nominal para la selección de agregado grueso*

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL TAMICES CON ABERTURAS CUADRADAS mm	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO kg
9,5 (3/8)	1(2)
12,5(1/2)	2(4)
19(3/4)	5(11)
25(1)	10(22)
37,5 (11/2)	15(33)
50 (2)	20(44)
63(2 1/2)	35(77)
75(3)	60(130)
90 (3 1/2)	100(220)
100 (4)	150 (330)
125 (5)	300(660)

Nota: Fuente Norma INV E 213-13

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Después de ser escogida y separada según la norma, se procede a realizar el ensayo. La masa se debe secar a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener una masa constante. Se seleccionan los tamices de tamaños adecuados para el ensaño encajándolos en orden decreciente por tamaño de abertura y se coloca la muestra que se va a ensayar en el tamiz superior. Se agitan los tamices a mano por un periodo de tiempo determinado teniendo en cuenta que la cantidad de material que se tomó garantice que todas las partículas tengan la oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz y se continúa tamizando de tal manera que no más del 1% de la masa del material retenido en un tamiz pase tras un minuto de tamizado a continuo a mano. En la Figura 3, se evidencia la distribución del material a utilizar en el ensayo.



Figura 3 Muestras para Análisis granulométrico

Fuente: propia

6.1.3 Resistencia a la degradación de los agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (3/4") por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles

Este ensayo tiene como propósito medir la degradación y proporcionar un índice de calidad de un agregado pétreo con una granulometría definida, aplicándole una serie de acciones que incluyen abrasión, impacto y molienda en un tambor de acero que gira con doce

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP esferas metálicas y contiene en su interior una pestaña de acero que arrastra el material mientras las doce esferas caen desde el extremo opuesto generando un efecto de impacto y trituración.

La norma que nos provee todas las indicaciones para realizar este ensayo es la (INVE-218, 2013) La muestra debe ser seleccionada nuevamente como se describe en la norma (INVE-201, 2013). Luego de ser seleccionada se lava y se deja en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que su masa sea constante. El tamaño de la muestra se elige según la granulometría más parecida a la del agregado que se va a utilizar como lo muestra la siguiente tabla

Tabla 4 *Granulometrías de las muestras de ensayo*

TAMAÑO		GRADACIÓN TIPO Y PESO DE CADA FRACCIÓN (g)						
PASA	RETENIDO	A	B	C	D	E	F	G
3"	2 1/2"					2500		
2 1/2"	2"				5000	2500		
2"	1 1/2"					2500	5000	
1 1/2"	1"	1250					5000	5000
1"	3/4"	1250						5000
3/4"	1/2"	1250	2500					
1/2"	3/8"	1250	2500					
3/8"	No 3			2500				
No 3	No 4			2500				
No 4	No 8							

Nota: Fuente norma INV E 219-13

Una vez seleccionado el material, se verifica que la máquina de los ángeles se encuentre totalmente limpia y se ubica el material dentro de la misma con su respectiva carga abrasiva. El tambor se hace girar a una velocidad de 188 a 208 rad/minuto (30 y 33 rpm) hasta completar 1000 revoluciones. Cuando finaliza la máquina, se procede a separar la muestra ensayada utilizando un tamiz de abertura mayor al del tamiz No. 12 y la fracción que pasa se tamiza por el tamiz No. 12 para finalmente lavarlo y secarlo al horno a una temperatura de

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
 $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante. En la figura 4 se muestra la distribución del material para ser ensayado y en la figura 5, se evidencia la ejecución del ensayo.



Figura 4 Muestra para ensayo Máquina de los ángeles
 Fuente: propia



Figura 5 Ensayo máquina de los ángeles
 Fuente: propia

6.1.4 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval

Este ensayo permite determinar la resistencia a la abrasión y la durabilidad de agregados pétreos con el uso de esferas de acero en presencia de agua la cual trabaja reduciendo la resistencia del material ensayado y los resultados son útiles para determinar un índice de calidad en los agregados. (INVE-238, 2013)

La muestra para este ensayo se obtiene del material que queda retenido entre el tamiz $\frac{3}{4}$ " y $\frac{3}{8}$ " preparándola según la siguiente tabla

Tabla 5 Muestra para el ensayo de Micro-Deval

PASA TAMIZ	RETENIDO EN EL TAMIZ	MASA
19.0 mm	16.0 mm	375 g
16.0 mm	12.5 mm	375 g
12.5 mm	9.5 mm	750 g

Nota: Fuente INV E 238-13

Luego de haber sido seleccionada la muestra se sumerge por un lapso de 1 h en 2.0 ± 0.5 litros de agua con una temperatura de $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$. después de transcurrido el tiempo se procede a

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

introducir la muestra junto con el agua usada para su saturación dentro del recipiente cilíndrico con 5000 ± 5 g de esferas de acero para posteriormente ser colocado en la maquina de Micro-Deval. La máquina debe ser configurada a 12000 ± 100 revoluciones y se hace rotar a una velocidad de $100 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$ durante un tiempo de $2\text{h} \pm 1 \text{ min}$

Al finalizar el tiempo de rotación se vierte la muestra sobre el tamiz No 4 y No 16 y se lava a mano hasta que el agua utilizada salga totalmente clara y se garantice que se desechó todo el material menor a 1.18 mm (No 16). Con un imán se retiran las esferas de acero, se seca el material retenido hasta masa constante y finalmente se pesa la muestra final. En la figura 6 se muestra el procedimiento del ensayo, micro-deval.



Figura 6 Ensayo de Micro-Deval

Fuente: propia

6.1.5 Determinación del valor del 10% de finos

Este ensayo se hace con el fin de determinar la resistencia que tiene un agregado grueso cuando se somete a un aplastamiento producto de un esfuerzo de compresión, debido a que las capas de los pavimentos deben soportar las cargas y distribuirlas correctamente de tal modo que no lleguen a desintegrarse y como resultado nos muestra cual es la carga necesaria para que el agregado produzca el 10% de finos (INVE-224, 2013)

Para preparar la muestra el agregado se debe obtener según la norma (INVE-201, 2013) y esta debe ser suficiente para producir tres fracciones comprendidas entre $\frac{1}{2}$ " y $\frac{3}{8}$ " como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6 Masa mínima para el ensayo de 10% de finos

GRANULOMETRIA	MASA MINIMA DE LA MUESTRA, Kg
Agregado todo uno, tamaño máximo 40 mm	60

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Agregado todo uno, tamaño máximo 20 mm	45
Agregado gradado (1 ½ a No 4)	40
Agregado gradado (¾ a No 4)	25
Agregado gradado (½ a No 4)	15

Nota: Fuente norma INV E 224-13

La muestra se deja secar al aire y se pasa por los tamices ½” y 3/8” descartando las partículas mayores y menores respectivamente para luego ser dividida en tres fracciones y vertidas en el cilindro y cada una debe ocupar una altura aproximada de 100 mm luego de ser compactadas con una varilla. Se meten al horno por un tiempo no mayor a 4 h a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se enfría a temperatura ambiente para luego ser anotadas sus masas.

Después de haber sido preparada la muestra se procede a realizar el ensayo. Se vierte la muestra en tres capas diferentes, compactando cada capa con 25 golpes con una varilla especificada en la norma, la altura de caída de la varilla debe rondar entre los 25 mm y el exceso de material será removido con una regla metálica luego de haber compactado las tres capas. Posteriormente se inserta el pistón y se deja descansar entre las platinas de la máquina para así, aplicar la carga de compresión con una velocidad uniforme para que el pistón alcance la penetración adecuada en un lapso de $10 \text{ min} \pm 30 \text{ s}$. La penetración adecuada esta especificada en la siguiente tabla.

Tabla 7 *Penetración requerida durante el ensayo de 10% de finos*

TIPO DE AGREGADO	PENETRACION mm
Redondeado o parcialmente redondeado; por ejemplo, grava natural	15
Agregados triturados normales	20
Agregados vesiculares; por ejemplo, escoria	24

Nota: Fuente norma INV E 224-13

Al obtener la penetración deseada en el tiempo correspondiente, se procede a anotar la carga aplicada en Newton, se libera el material del cilindro y se pesa la bandeja con el agregado, esta masa se denomina (M1). Se procede a tamizar el agregado por el tamiz No 8 hasta que no pase ninguna partícula durante 1 min para luego pesar las fracciones pasantes y retenidas denominadas M2 Y M3 respectivamente. Si la suma de M2+M3 muestra una

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
diferencia con M1 de más de 10g se descarta el ensayo y se debe realizar nuevamente. Si la relación M2/M1 en porcentaje no está entre 7.5% y 12.5% se deberá ensayar de nuevo aplicando la carga máxima de ensayo. En la figura 7, se evidencia el procedimiento del ensayo de 10% de finos.



Figura 7 Ensayo 10% de finos
Fuente: propia

6.1.6 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.

Este ensayo determina la resistencia de los agregados pétreos cuando se encuentran a la intemperie como es el caso de los concretos entre otras aplicaciones. Para simular el efecto, se sumergen los agregados en soluciones saturadas de sulfato de sodio o de magnesio para luego proceder a secarlo en el horno con el fin de deshidratar parcial o completamente la sal que se encuentra en los poros permeables de las partículas. (INVE-220, 2013)

La solución utilizada para el caso de este ensayo fue la de sulfato de sodio, para la cual se sumergieron 7 libras de sal en 10 litros de agua, con el fin de garantizar no solo la saturación sino también el exceso de cristales cuando la solución está lista para realizar el ensayo. La solución debe ser agitada periódicamente y debe ser cubierta para evitar su evaporación. Antes de ser empleada, la solución debe tener una temperatura de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ por lo menos 48 horas antes y previo a cada aplicación, se debe romper la pasta de sal agitando la solución y esta debe tener una gravedad específica entre 1.154 y 1.171.

La muestra de agregado fino se obtiene según la siguiente tabla 8 y se debe obtener 100 g de cada una de las fracciones.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 8 *Muestra de agregado fino para ensayo de solidez*

PASA TAMIZ	RETENIDO EN TAMIZ
600 μm (No 30)	300 μm (No 50)
1.18 mm (No 16)	600 μm (No 30)
2.36 mm (No 8)	1.18 mm (No 16)
4.75 mm (No 4)	2.36 mm (No 8)
9.5 mm (3/8")	4.75 mm (No 4)

Nota: Fuente norma INV E 220-13

Para preparar la muestra de agregado fino, se lava sobre el tamiz No. 50 y se deja secar hasta masa constante a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se separa las diferentes fracciones por medio de tamizado garantizando 100 ± 1 g de cada una.

A su vez, la muestra de agregado grueso se obtiene según la siguiente tabla 9

Tabla 9 *Muestra de agregado grueso para ensayo de solidez*

TAMICES	MASA, g	COMPOSICION DEL MATERIAL
De 4.75 mm a 9.5 mm (No 4 a 3/8")	300 ± 5	
De 9.5 a 19 mm (3/8" a 3/4")	1000 ± 10	de 9.5 mm a 12.5 mm (3/8" a 1/2") 330 ± 5 g de 12.5 mm a 19.0 mm (1/2" a 3/4") 670 ± 10 g
de 19.0 mm a 37.5 mm (3/4" a 1 1/2")	1500 ± 50	
de 37.5 mm a 63 mm (1 1/2" a 2 1/2")	5000 ± 300	de 19.0 mm a 25.0 mm (3/4" a 1") 500 ± 30 g de 25.0 mm a 37.5 mm (1" a 1 1/2") 1000 ± 50 g
de 63 mm a 75 mm (2 1/2" a 3")	7000 ± 1000	
de 75 mm a 90 mm (3" a 3 1/2")	7000 ± 1000	de 37.5 mm a 50 mm (1 1/2" a 2") 2000 ± 200 g de 50 mm a 63 mm (2" a 2 1/2") 3000 ± 300 g
de 90 mm a 100 mm (3 1/2" a 4")	7000 ± 1000	

Nota: Fuente norma INV E 220-13

Esta muestra se lava y se deja secar en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se separa en las fracciones indicadas en la Tabla 9 tamizando de tal manera que no pase más material no ningún tamiz.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Al finalizar la preparación de las muestras, se procede a realizar el ensayo. Las muestras tanto de agregado fino como de agregado grueso se dejan sumergidas en la solución de sulfato de sodio un tiempo no menor a 16 h ni mayor a 18 h cerciorándose de cubrir las muestras para evitar la evaporación y que la temperatura sea de $21 \pm 1^\circ\text{C}$ durante todo el tiempo de inmersión. Luego de transcurrido el tiempo, se escurre la muestra durante 15 ± 5 min para introducirla en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sacándola y pesándola en intervalos de 2 a 4 h para así lograr determinar la masa constante. Finalmente, la muestra se saca del horno y se deja enfriar a temperatura ambiente para luego ser sumergida nuevamente. El número de ciclos o repeticiones de este ensayo son 5 veces. En la figura 8, se evidencia el ultimo lavado realizado a los agregados en el ensayo de solidez.



Figura 8 Ensayo de solidez
Fuente: propia

6.1.7 Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso

Este ensayo se hace con el fin de determinar las densidades del agregado grueso las cuales son: densidad promedio la cual no incluye vacíos en las partículas, la densidad relativa que hace referencia a la gravedad específica y la absorción que tiene el agregado. (INVE-223, 2013)

Para la preparación de la muestra se comienza por mezclar y cuartear el agregado y se debe eliminar el material inferior a 4.75 mm (No. 4) mediante un tamizado en seco y posteriormente debe ser lavado para remover los finos adheridos a la superficie.

La masa mínima para este ensayo se indica en la siguiente tabla

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 10 *Masa mínima para densidad del agregado grueso*

Tamaño máximo Nominal		Masa mínima de la muestra de ensayo	
mm	Pg.	kg	lb
12.5	½	2	4.4
19	¾	3	6.6
25	1	4	8.8
37.5	1 ½	5	11
50	2	8	18
63	2 ½	12	26
75	3	18	40
90	3 ½	25	55
100	4	40	88
125	5	75	165

Nota: Fuente norma INV E 223-13

Es importante tener en cuenta que si la muestra contiene más del 15% retenido en el tamiz de 375 mm (1 ½) este material se debe fraccionar aparte de las más pequeñas.

Luego de tener lista la muestra se procede a realizar el ensayo metiendo la masa al horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante para luego dejarla enfriar por un lapso de 1 a 3 h para muestras de tamaño máximo nominal hasta de 3.75 (1 ½) o un lapso mayor para muestras mayores hasta que el agregado sea manipulable (50°C aproximadamente) para posteriormente sumergirlo en agua por un periodo de 24 h a temperatura ambiente.

Después del periodo de inmersión, se seca el agua visible de los agregados con un pañuelo absorbente, secando individualmente las partículas de mayor tamaño. Se pesa la muestra en condición saturada superficialmente seca (SSS) y las masas se deben determinar con una aproximación de 0.5 g o 0.05% de la masa de la muestra, la que sea mayor.

Después de determinar la masa en el aire, se coloca la muestra en una canastilla para sumergirla en el agua a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y se deben eliminar las burbujas de aire agitando la canastilla dentro del agua.

Finalmente, se seca la masa en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante y se deja enfriar hasta que sea manipulable, se determina su peso en condición seca

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP al horno (SH). En la figura 9, se evidencia el agregado grueso siendo ensayo para determinar la densidad de este.



Figura 9 Ensayo densidad de agregados gruesos
Fuente: propia

6.1.8 Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso

El objetivo principal de este ensayo es determinar qué porcentaje de una masa de muestra tomada de agregado grueso tiene las caras fracturadas. Las caras fracturadas en un agregado maximizan la resistencia al corte, incrementando la fricción entre partículas, les da estabilidad a los agregados usados y proporciona mayor fricción y textura en la construcción de capas de rodadura. (INVE-227, 2013)

Para preparar la muestra se debe optar por alguna de las dos opciones que nos da la norma. La primera opción es que debe ser lo suficientemente grande para que las partículas de mayor tamaño no superen el 1.0% de la masa de la muestra o la segunda opción es determinar la masa según la siguiente tabla:

Tabla 11 *Muestra para caras fracturadas*

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL mm (pulgadas)	MASA MINIMA DE LA MUESTRA g (lb aprox)
9.50 (3/8)	200 (0.5)
12.5 (1/2)	500 (1.0)
19.0 (3/4)	1500 (3.0)
25.0 (1)	3000 (6.5)

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

37.5 (1 ½)	7500 (16.5)
50.0 (2)	15000 (33)
63.0 (2 ½)	30000 (66.0)
75.0 (3)	60000 (132.0)
90.0 (3 ½)	90000 (198.0)

Nota: Fuente norma INV E 227-13

Luego de tomada la muestra con cualquiera de las dos opciones se debe tamizar sobre el tamiz 4.75 mm (No 4) y posteriormente reducirla por cuarteo de acuerdo con la norma (INVE-202 , 2013)

Se procede a realizar el ensayo lavando el material sobre el tamiz previamente mencionado con el fin de eliminar todo tipo de finos adheridos a las partículas de tamaño grueso y se seca a masa constante. Se esparce la muestra sobre una superficie limpia y plana para inspeccionar cada una de las partículas, sosteniendo cada una de tal manera que la cara se le pueda ver directamente. Se considera cara fracturada cuando al menos ocupa un cuarto de la mayor sección de la partícula.

Como paso a seguir se debe dividir la muestra en dos porciones, las que cumplen con el criterio de fracturada y las que no, tomando la masa de cada una respectivamente para calcular el porcentaje de cada porción y si las caras fracturadas con una o dos caras se superponen sobre las que solo tienen una cara fracturada se debe repetir el ensayo.

6.1.9 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras

La forma de los agregados a la hora de implementarlos en una mezcla puede influir mucho en su comportamiento, como, por ejemplo, las partículas planas o alargadas pueden producir inconvenientes ya que hacen que una mezcla sea poco trabajable lo que afecta directamente a la vida útil de la misma. Por otra parte, cuando se encuentra un porcentaje muy alto de estas partículas en mezclas asfálticas pueden sufrir fracturas durante el proceso de compactación afectando la granulometría inicial de la mezcla afectando su comportamiento. (INVE-230, 2013)

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

La muestra del agregado se escoge según el tamaño máximo nominal del agregado como se muestra en la siguiente tabla

Tabla 12 *Muestra para alargamiento y aplanamiento de los agregados*

TAMAÑO MAXIMO NOMINAL DEL AGREGADO, mm (pg.)	MASA MINIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DEL INDICE DE APLANAMIENTO, mm	MASA MINIMA DE LA MUESTRA PARA EL ENSAYO DE INDICE DE ALARGAMIENTO, kg
50 mm (2")	35	-
37.5 mm (1 ½")	15	15
25 mm (1")	5	5
19 mm (¾")	2	2
12.5 mm (½")	1	1
9.5 mm (3/8")	0.5	0.5

Nota: fuente norma INV E 230-13

Se reduce la muestra por cuarteo, se seca a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante y se deja enfriar a temperatura ambiente. Es de suma importancia tener en cuenta que para el índice de aplanamiento se deben descartar las partículas retenidas en el tamiz 63 mm (2 ½") y las que pasan por el de 6.3 mm (1/4") y para el índice de alargamiento se deben descartar las retenidas en el tamiz 50 mm (2") y las que pasan el de 6.3 mm (1/4").

Se pesa las muestras retenidas en cada tamiz por separado y la masa destinada para hallar índice de aplanamiento se debe llamar M1 y las destinada para índice de alargamiento se debe llamar M11. Se debe calcular el porcentaje de masa retenida entre cada par de tamices y si alguna representa menos del 5% de M1 o M11 se debe descartar.

Se procede a realizar el ensayo.

Para el índice de aplanamiento se usa el método manual, pasando las piedras por el calibrador de aplanamiento una por una a mano sin forzarlas ni romperlas y finalmente se combinan y pesan todas las partículas que pasaron por las aberturas y esta masa se denomina M3.

Para el índice de aplastamiento se pasan las partículas por la mayor dimensión entre el par de barras del calibrador y las partículas alargadas son aquellas que no logran pasar por dicho espacio y se ponen aparte del resto de partículas para determinarle su masa. A las partículas que logran entrar en el espacio también se les debe determinar la masa.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

6.1.10 Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino

Este ensayo se hace con el fin de determinar la densidad promedio de las partículas de agregado fino sin incluir los vacíos entre ellas, la gravedad específica y la absorción del agregado fino (INVE-222, 2013). Del mismo modo, este ensayo nos ayuda a calcular el volumen que ocupan los agregados en las mezclas de concreto asfáltico como lo es en el caso de nuestra investigación.

La densidad aparente y la densidad relativa aparente se refiere a las partículas excluyendo todo espacio en ellas que sea accesible al agua mientras que los valores de absorción ayudan a calcular el cambio de masa que se produce a causa de absorber agua por los poros de las partículas.

La muestra se debe obtener de acuerdo con la norma (INVE-202 , 2013) y reducirse a un tamaño de aproximadamente 1 kg. Se seca la muestra a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante para luego dejarse enfriar de tal manera que la muestra sea manipulable, posteriormente se sumerge en agua o se le añade la necesaria para que su humedad sea del 6% o más por un periodo de 24 ± 4 h.

Luego de tener la muestra en esas condiciones, se procede a extenderla en una superficie no absorbente y se le suministra una corriente de aire tibio cuidadosamente de tal manera que no se pierda el material fino hasta que esta muestra una condición aparente de saturada superficialmente seca (SSS) y para verificar esta condición, se realiza la prueba del cono, la cual consiste en introducir la muestra en un cono hasta que rebose para luego compactarlo ligeramente dándole 25 golpes con una varilla dejándola caer libremente, posteriormente se limpia la base del cono para luego retirarlo, si al ser extraído, la muestra mantiene la forma del cono significa que hay humedad superficial aun así que se debe repetir este procedimiento hasta que la muestra se derrumbe parcialmente.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Luego de ser preparada la muestra, se procede a realizar el ensayo por el método gravimétrico.

El método gravimétrico consiste básicamente en llenar parcialmente un picnómetro con agua e introducir la muestra saturada superficialmente seca (SSS) luego se termina de llenar el picnómetro hasta completar aproximadamente el 90% de su capacidad y se deben eliminar las burbujas de aire agitándolo, rodándolo e invirtiéndolo y finalmente se saca la muestra se deja en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante se deja enfriar y se determina la masa y se determina la masa del picnómetro llenándolo de agua hasta su máxima capacidad. En la figura 10 se evidencia el cono formado por el material fino para poder continuar con su ensayo.



Figura 10 gravedad específica de finos

Fuente: propia

6.1.11 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)

El objetivo principal de este ensayo es determinar la angulosidad, la esfericidad y la textura superficial del agregado fino el cual nos da un indicador de cómo se comporta en la mezcla en la cual se piensa emplear.

La información que se obtiene a partir de este ensayo es útil para determinar el efecto del agregado fino sobre la estabilidad y los vacíos en el agregado mineral (VAM) de concretos asfálticos que el que nos interesa en este caso y la estabilidad de la porción de agregado fino

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP en una base granular. La muestra se obtuvo por el método A descrito en la norma (INVE-239, 2013) combinando y secando cada una de las porciones especificadas en la siguiente tabla

Tabla 13 muestra para contenido de vacíos en agregados finos

FRACCION DE TAMAÑO INDIVIDUAL	MASA g
2.36 mm (No.8) a 1.18 mm (No. 16)	44
1.18 mm (No. 16) a 600 μm (No. 30)	57
600 (No. 30) μm a 300 μm (No. 50)	72
300 (No. 50) μm a 150 μm (No. 100)	17
TOTAL	190

Nota: fuente norma INV E 239-13

Se procede a realizar el ensayo mezclando cada porción de agregado previamente seleccionado hasta que parezca homogéneo. Se alista el equipo compuesto por un recipiente cilíndrico y un embudo centrando el recipiente de tal manera que quede alineado verticalmente con el embudo. Se vierte la muestra tapando la parte inferior del embudo con el dedo, luego se retira el dedo y se deja caer libremente hasta que rebose el cilindro, el exceso de material se retira cuidadosamente evitando vibraciones que puedan compactar el material, para esto se usa una espátula para enrasar en el exceso de material y una brocha para limpiar la base del cilindro y se determina la masa del recipiente con el contenido y este procedimiento se realiza dos veces mezclando el material del cilindro con el que quedó en la bandeja y se debe tomar la masa del recipiente cilíndrico vacío. Finalmente se promedian los dos resultados. En la figura 11 se evidencia el ensayo de contenido de vacíos en agregado finos en ejecución.



Figura 11 Ensayo de determinación de contenido de vacíos en agregados finos
Fuente: propia

6.1.12 Equivalente de arena de suelos y agregados finos

Este ensayo tiene como objetivo determinar la presencia de finos o material de apariencia arcillosa presente en el agregado menor a 4.75 mm (No. 4). Este método ayuda a determinar en el campo variaciones de calidad de los agregados durante su producción o colocación. Es de suma importancia delimitar el contenido mínimo de arena que debe tener un agregado fino, debido a que, hay polvos y arcillas indeseables que pueden superar en cantidad el material que realmente conviene para uso en una mezcla. (INVE-133, 2013)

Para llevar a cabo este ensayo, es de suma importancia realizarlo en un lugar libre de vibraciones, debido a que estas pueden causar la sedimentación del material fino y dar un valor de equivalente de arena mucho mayor que el real.

La muestra para este ensayo debe ser mínimo 1500g de material que pase por el tamiz 4.75 mm (No. 4), se debe tamizar el material hasta que no mas el 1% del peso en residuo pase por el tamiz durante 1 min, se deben desmenuzar los terrones y limpiar los finos que quedan adheridos al agregado grueso.

Luego de estar listo el material, se utiliza el procedimiento A descrito en La norma (INVE-133, 2013) que indica que al material se le debe adicionar agua cuidadosamente, sin afectar su flujo libre para que a la hora de realizar el cuarteo no se pierdan los finos de la muestra. se cuarteo la muestra y cada vez que se saca una porción, se debe golpear el recipiente de tal manera que el material quede consolidado en el fondo para lograr introducir la máxima cantidad y luego se determina la cantidad de material pensándolo. Se devuelve la muestra, se cuarteo de nuevo y se hacen los ajustes según la norma (INVE-202 , 2013) para proporcionar un espécimen de ensayo y finalmente se mete al horno a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta masa constante y se deja enfriar a temperatura ambiente antes de proceder a realizar el ensayo [23]

Luego de tener lista la muestra, se procede a realizar el ensayo. Como primera medida, se introduce la solución de cloruro de calcio a una altura de 101.6 ± 2.54 mm y con ayuda del

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

embudo se vierte el espécimen del ensayo en el cilindro graduado. Se debe golpear varias veces el cilindro por la parte inferior con la palma de la mano para liberar las burbujas de aire y así mismo remojar la muestra por completo. Se deja en reposo durante 10 ± 1 min para posteriormente colocar el tapón en la boca del cilindro y así aflojar el material invirtiéndolo y agitándolo simultáneamente.

Luego de esto, se agita el cilindro con un agitador mecánico durante 45 ± 1 s e inmediatamente después de la agitación, el cilindro debe ponerse en posición vertical sobre la mesa para llevar a cabo el procedimiento de irrigación.

El procedimiento de irrigación consiste básicamente en introducir el tubo irrigador, primero lavando las paredes del cilindro y luego llevándolo cuidadosamente hasta el fondo y dejando fluir la solución de tal manera que los finos que se encuentren en el fondo suban y se suspendan sobre las partículas gruesas de la arena.

Se debe retirar el tubo de tal manera que no deje de fluir la solución hasta que no llegue a una altura de 381 mm (15”) e inmediatamente después de haber sacado el tubo, se debe dejar la muestra en reposo de $20 \text{ min} \pm 15\text{s}$.

Para finalizar, después de pasados los 20 min, se deben tomar las lecturas de arcilla y arena. La lectura de arcilla se lee en la parte superior del cilindro donde se encuentra la suspensión arcillosa y para la lectura de la arena, se debe introducir cuidadosamente el medidor sin tocar las paredes del cilindro hasta que repose sin presión en la arena, se inclina el indicador del dispositivo y cuando toque la pared del cilindro se le restan 254 mm (10”) y a ese valor se le denomina lectura de arena. Luego de tomar las lecturas, se retira el medidor, se pone el tapón, se agita nuevamente el material para que el material sedimentado se desprege y se procede a desechar la muestra para lavar el cilindro mínimo dos veces con abundante agua. En la figura 12 se evidencia el procedimiento realizado en el ensayo de equivalente de arena, teniendo en cuenta que este ensayo se realizó dos veces para así promediar y tener un resultado más acertado.



Figura 12 Ensayo equivalente de arena
Fuente: propia

6.1.13 Determinación del límite líquido de los suelos

La determinación del límite líquido es de suma importancia en la ingeniería, debido a que, este interviene en varios sistemas de clasificación de suelos dado a que contribuye a la caracterización de la fracción fina de los suelos, además, cuando un suelo es secado al horno y este contiene cantidades apreciables de materia orgánica el límite líquido disminuye dramáticamente lo cual significa que se puede emplear como una medida cualitativa del contenido de materia orgánica de un suelo.

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma (INVE-125, 2013)

Para tomar la muestra de este ensayo, se debe obtener una porción de 150 a 200 g de material que pase por el tamiz de 425 μm (No 40), si la muestra fluye libremente se debe ser reducida por cuarteo, pero si son suelos cohesivos, se deben mezclar completamente con una espátula o un cucharón y se toma como muestra representativa una porción tomada por el cucharón. Después de haber obtenido la muestra, se debe preparar antes de ser ensayada se deben mezclar de 150 a 200 g de material con agua en el recipiente de mezclado usando una espátula, dependiendo del método, se ajusta su humedad. Si se usa el método A se debe remojar el material de tal manera que la ranura cierre de 25 a 35 golpes. La muestra se debe dejar tapada para evitar pérdida de humedad por un periodo de 16 h.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Luego de tener listo el espécimen, se procede a realizar el ensayo, se remezcla para que adquiera la consistencia requerida para que sean necesarios entre 25 y 35 golpes, se coloca una cantidad adecuada sobre la copa y se extiende de tal manera que tenga 10 mm de profundidad en su punto máximo de espesor siendo cuidadosos de no dejar burbujas dentro de la muestra y la masa excedente se vuelve a dejar en el recipiente mezclador. El suelo colocado en la copa debe ser dividido con una pasada firme del ranurador desde el borde más alto de la muestra hasta el más bajo que está en el borde de la cazuela. Se procede a realizar los golpes de forma eléctrica a una velocidad de 1.9 a 2.1 revoluciones por segundo hasta que las dos mitades de la pasta de suelo se pongan en contacto en el fondo de la ranura a lo largo de una distancia de $\frac{1}{2}$ " y se registra el número de golpes N requeridos para cerrar la ranura. Finalmente se toma una muestra del suelo ensayado y se pesa inmediatamente después de terminado el ensayo, luego se deja secar en el horno hasta obtener una masa constante y se vuelve a pesar. En la figura 13 se evidencia que el ensayo de limite liquido no arrojo algún resultado debido a que el material utilizado para este proyecto no contiene arcilla.



Figura 13 Ensayo limite liquido

Fuente: propia

6.1.14 Limite plástico e índice de plasticidad de los suelos

El limite plástico y el limite liquido son dos de los seis límites de consistencia que definió Atterberg. Por un lado, el índice de plasticidad se usa para establecer correlaciones sobre su

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP comportamiento en la ingeniería tales como compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, los procesos de expansión y contracción y la resistencia al corte. Por otro lado, los límites líquido y plástico de un suelo junto con el contenido de agua, se usan para expresar su consistencia relativa o índice de liquidez. (INVE-126, 2013)

Para preparar la muestra del límite plástico de este ensayo, debemos dirigirnos a la sección 7 de la norma INV E 125-13. Se toma una porción de 20g o un poco más del suelo preparado para el ensayo de límite líquido, se reduce el contenido de agua del suelo hasta que alcance una consistencia que permita enrollarlo sin que se pegue a las manos, mezclándolo sobre una placa de vidrio y el proceso de secado se puede acelerar exponiéndolo a una corriente de aire como la de un ventilador.

Luego de estar lista la muestra, se procede a realizar el ensayo, se toma una porción de 1.5 a 2 g con la cual se forma una masa elipsoidal y por el método manual, se forman rollos haciendo rodar la masa de suelo entre la palma de la mano y una superficie de vidrio antiadherente logrando obtener un diámetro uniforme en toda su longitud hasta lograr 1/8" sin tomarse más de dos minutos. Ya alcanzado dicho diámetro, se divide en varios trozos y se vuelven a juntar amasándolo con los dedos de las manos y se vuelve a enrollar hasta alcanzar nuevamente dicho diámetro y se repite este procedimiento hasta que el suelo solo se desborone con la presión requerida para enrollarlo y no logre llegar más a 1/8" de diámetro. Luego de no poder enrollar más el suelo, se introduce la muestra en un recipiente de masa conocida y se repite el procedimiento hasta que tener una masa mínima de 6 g, se mete al horno y se determina el contenido de agua de la muestra.

6.2 Caracterización del asfalto

6.2.1 Ductilidad de los materiales asfálticos

El ensayo de ductilidad para materiales asfálticos, brinda una medida de resistencia a la tensión del material y muestra que un asfalto de baja ductilidad tiene propiedades adhesivas pobres y un comportamiento deficiente cuando se aplica en una muestra.

Para este ensayo, es necesario contar con un molde de bronce, una placa plana de bronce para el llenado de los moldes, un baño de agua que pueda mantener la temperatura con una variación máxima de 0.5°C, el ductilometro que es la máquina de ensayo y un agente desmoldante para que la muestra no se adhiera al molde entre otra herramienta menor.

Para preparar la muestra, se deben preparar las probetas ensamblando el molde sobre la placa de bronce encontrándose a nivel para que todas las piezas del molde se sienten sobre ella y luego se le debe esparcir una capa de agente desmoldante. El asfalto debe calentarse hasta cuando se encuentre lo suficientemente fluido para verterlo sobre el molde cuidadosamente para que las piezas del molde no se separen y así evitar la distorsión de esta. Se deja enfriar la muestra de 30 a 40 min y posteriormente se sumerge en agua y se retira para enrasar la muestra con una espátula.

Se procede a realizar el ensayo sumergiendo nuevamente la muestra en un baño de agua en un tiempo comprendido entre 85 y 95 min para mantener su temperatura y posteriormente retirar la placa y las piezas laterales del molde y queda lista para empezar el ensayo.

Se introduce la muestra dentro del ductilometro poniendo en marcha el mecanismo de arrastre del equipo que consiste en un punto fijo y un punto móvil donde se acomoda la muestra y se deja trabajar a una velocidad constante hasta que se produzca rotura o se alcance la longitud total del ductilometro. En la figura 14 se muestra el inicio del ensayo y el estiramiento del material utilizado.



Figura 14 Ensayo ductilidad de materiales asfálticos
Fuente: propia

6.2.2 Penetración de los materiales bituminosos

El ensayo de penetración de los materiales bituminosos es comúnmente usado para medir la consistencia que tiene el asfalto a cierta temperatura.

Para preparar la muestra es importante que el asfalto tenga una consistencia fluida homogénea, por eso debe ser calentada cuidadosamente agitándola para evitar sobrecalentamientos locales, el tiempo debe ser el mínimo para que alcance la fluidez y no debe exceder de 90°C la temperatura. Se vierte la muestra en el recipiente de ensayo garantizando que cuando esté fría la altura sea al menos el 120% de la profundidad de lo que se espera que penetre la muestra. Se deja enfriar la muestra a una temperatura de 15 a 30°C por un periodo entre 45 m y 1 ½ hora.

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la noma (INVE-706, 2013)

Las condiciones del ensayo son: 25°C para la temperatura, 100 g para la carga y 5 s para el tiempo de duración de esta.

Para realizar el ensayo el vástago y la aguja deben estar completamente limpios y se coloca el peso adicional al vástago de 50 g para completar los 100 g de carga y se ubica el recipiente de la muestra en la base del penetrómetro, verificando que se encuentre correctamente nivelado, se suelta la aguja y se anota la distancia que penetra la muestra en milímetros. Se deben realizar tres penetraciones diferentes en diferentes puntos separado 10

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP mm una de cada una y de las paredes del recipiente. En la figura 15, se evidencia el valor arrojado por la maquina utilizada en el ensayo de penetración.



Figura 15 Ensayo de penetración del asfalto
Fuente: propia

6.2.3 Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland

El ensayo de punto de inflamación y punto de llama es una forma de evaluar la inflamación de un material, en este se realiza de manera controlada en un ensayo de laboratorio y este a su vez provee da indicios de que quizás se puedan encontrar materiales altamente volátiles en los materiales bituminosos y los resultados que brinda se toman para estimar precauciones durante la manipulación de este. (INVE-709, 2013)

Este ensayo se lleva a cabo en la copa abierta de Cleveland y un termómetro de mercurio que se ajusta a las altas temperaturas que se manejan.

Se vierte un poco de asfalto a la copa hasta el nivel de marca de llenado de la copa y debe tener una temperatura que no sea mayor a 56°C, pero teniendo en cuenta que este no debe estar sólido. Se procede a implementarle calor incrementando la temperatura de 5 a 17°C por minuto.

Cuando la temperatura de la muestra se encuentra a una temperatura de 28°C se comienza el barrido con la llama a través del centro de la copa en ángulos rectos en un tiempo de $1 \pm$

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

0.1 s hasta que la muestra bote una chispa la cual indica que es el punto de inflamación y se debe anotar la temperatura en que esta se produjo.

Para determinar el punto de combustión se continúa calentando el espécimen y el barrido con la llama en el centro de la copa hasta que la muestra se encienda y permanezca encendida por lo menos 5 segundos y se anota la temperatura a la que este se produjo.

Al finalizar se apaga la llama de barrido, se dejan enfriar los accesorios y se procede a limpiarlos. En la figura 16, se evidencia el resultado de punto de chispa y llama respectivamente.

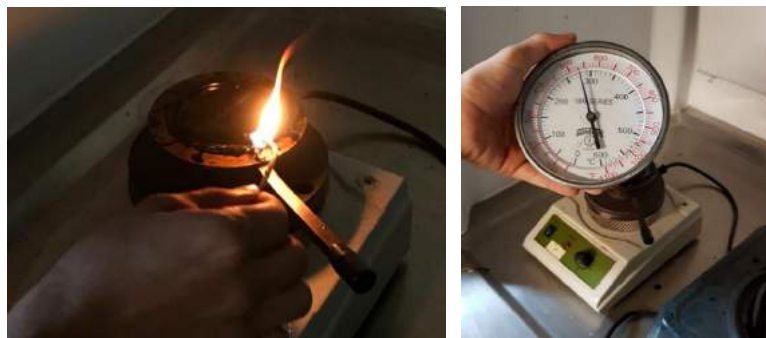


Figura 16 Ensayo de punto de chispa y llama
Fuente: propia

6.2.4 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)

El asfalto es un material bituminoso viscoelástico y no cambia de estado sólido a líquido a una temperatura definida, su transformación o cambio de esta viene a partir de aumentos graduales de temperatura y debido a esto, se debe determinar su punto de ablandamiento con un ensayo que ofrezca resultados reproducibles y comparables.

Para cumplir el objetivo de este ensayo, el cual se refiere a determinar el punto de ablandamiento de un asfalto a intervalos de temperatura de 30 a 157°C utilizando el aparato de anillo y bola sumergido en agua destilada. (INVE-712, 2013)

Para preparar la muestra, se debe calentar el asfalto agitándolo para prevenir sobre calentamientos localizados y no se debe calentar a más de 100°C. luego de ser calentado, se vierte la muestra cuidadosamente con un ligero exceso en los anillos del aparato de ensayo

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP previamente impregnados con un antiadherente, se deja enfriar la muestra y una vez este a temperatura ambiente se enrasan los excesos para que la muestra quede al mismo nivel de los anillos.

Se procede a realizar el ensayo con agua destilada hervida y realizando el montaje del aparato guiándose de las marcas que tiene para el centrado de las bolas y la ubicación del termómetro, se empieza a calentar el aparato con una rata constante de elevación de 5°C mín. en forma pausada y cuando la muestra que está ubicada en el anillo descienda y toque el fondo de la placa, se anota la temperatura y llegado el caso en el que la temperatura en la que las dos muestras desciendan se diferencie en 1°C el ensayo debe descartarse y realizarse de nuevo. En la figura 17, se evidencia el calentamiento del asfalto sobre una plancha calentadora, para determinar el punto de ablandamiento del asfalto.



Figura 17 Ensayo punto de ablandamiento
Fuente: propia

6.3 Diseño Marshall

6.3.1 Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall

El objetivo principal de este ensayo consiste en determinar la resistencia a la deformación plástica de especímenes de mezclas asfálticas para pavimentación según la norma (INVE-748, 2013)

Para el desarrollo de este ensayo se fabricaron 3 probetas cilíndricas, cada una con un peso aproximado de 1200 g, con un diámetro de 102mm y una altura nominal de 63.5mm por cada

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
porcentaje de asfalto, empezando desde 3,5% y terminando hasta 6,5% para el diseño

Marshall convencional (con incrementos de y para diseño Marshall modificado se utilizaron porcentajes de asfalto desde 3% hasta 6%. De manera que los resultados se puedan graficar en curvas que indiquen un contenido “optimo” de asfalto.

Los agregados utilizados para la preparación de las briquetas tanto convencionales como modificadas se dejaron secar hasta masa constante en un horno a temperatura de 140 a 160 °C. Posterior a esto, se separaron en bandejas de a 1200 g aproximadamente, distribuidos en porcentajes hallados para el cumplimiento de la granulometría. En la figura 18, se evidencia la distribución del material por briquetas antes de ser colocado en el horno.



Figura 18 Preparación de material para briquetas
Fuente: propia

Luego de dejar la mezcla 24 horas en el horno, se procedió a realizar el mezclado junto al asfalto previamente caliente. Este mezclado se realizó hasta llegar a una mezcla homogénea en aproximadamente 2 minutos. En la figura 19 se muestra el procedimiento del mezclado de los agregados con el asfalto.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP



*Figura 19 Mezcla de los agregados y asfalto
Fuente: propia*

Las mezclas homogéneas se dejaron en un lapso de reposo y nivelación de temperatura por un tiempo de 3 horas, posterior a esto se procedió a la compactación de las briquetas.

Se introdujo la mezcla en un molde el cual estaba a una temperatura de 100°C y se procedió a compactar la muestra con ayuda de un martillo. Se compactaron 75 veces por cada uno de los lados del molde para así cumplir con lo establecido en la Norma (INVE-748, 2013).

El desencofrado se realizó al día siguiente de la compactación y posterior a esto se realizó la toma de gravedades específicas Bulk de cada una de las briquetas siguiendo los procedimientos descritos en las normas (INVE-733, 2013) y (INVE-802, 2013), como se muestra en la siguiente figura;



*Figura 20 Briquetas desencofradas y toma de gravedad específica BULK
Fuente: propia*

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

El ensayo de estabilidad y flujo se realizó dentro de las 24 horas siguientes a la compactación de las probetas. Colocando estas en un baño de agua durante 32 minutos a una temperatura de 60°C.

Después del tiempo de baño María, se colocaron las briquetas en las mordazas de manera fija y se ubican en la máquina de compresión, aplicándole así una carga sobre cada una de las probetas a estudiar hasta que ocurra la falla. Para este procedimiento, se tuvo que poner los diámetros y alturas exactas de cada uno de los especímenes a ensayar. Para así tener como resultado la estabilidad, flujo y el factor de corrección. En la figura 21 se muestra como falla una briqueta en el ensayo estabilidad y flujo.

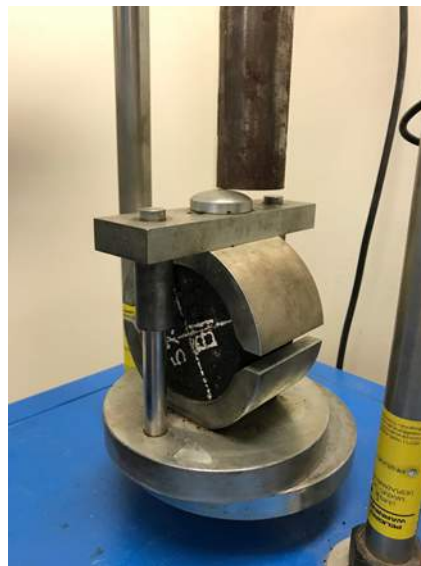


Figura 21 Ensayo Marshall
Fuente: propia

6.3.2 Análisis Volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente

Para continuar con el Diseño Marshall convencional y Diseño Marshall modificado, se tuvo en cuenta el porcentaje de vacíos y con él, la determinación de GMM y Gse de cada uno de los porcentajes de asfalto utilizados en el diseño Marshall para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma (INVE-799, 2013)

Se calentó en un horno a temperatura de 90°C una briqueta por cada porcentaje de asfalto en bandejas y se procedió a destruir de manera que todo el material utilizado en ellas quedara

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP desprendido. Se dejaron enfriar, se tomó una porción de cada muestra y se introdujeron una a una el material dentro de un matraz, se le adiciono agua, se pesó y se puso sobre una plancha calentadora y se dejó hervir.

Esto se realiza para eliminar el contenido de aire que quedo dentro de las partículas del material utilizado. Como se muestra en la siguiente figura.



Figura 22 Ensayo de GMM
Fuente: propia

Se deja enfriar hasta que el agua tenga una temperatura de 25°C y se pesa el material con el agua. Con ayuda de este proceso de determinaron los valores de Gse (Gravedad especifica efectiva del agregado combinado) y Gmm (Gravedad especifica máxima de la mezcla) y consigo los valores de Asfalto Absorbido, Asfalto efectivo, Vam (Vacíos en el agregado mineral de la probeta compactada), VFA y relación Llenante/ Ligante efectivo

6.4 Verificación de los Diseños Marshall preliminares

Para la verificación del diseño preliminar se hizo por medio de pruebas o ensayos los cuales están consignados en la norma (INVE-450, 2013) los cuales son; Adherencia, Resistencia al ahuellamiento y módulos resilientes. Para la realización de estos ensayos se utilizan especímenes elaborados con la mezcla optima arrojado en el diseño preliminar tanto

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP para el diseño Marshall convencional que para el diseño Marshall modificado con adición de fresado.

6.4.1 Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta

El objetivo principal de este ensayo es medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta sobre probetas previamente elaboradas con el porcentaje óptimo del diseño Marshall convencional (5,6%) y Diseño Marshall modificado con adición de fresado (5,2%).

Este ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma (INVE-725, 2013)

Para poder empezar con el ensayo, se tuvieron que elaborar diferentes briquetas con número de golpes diferentes que a la hora de tomar de ellas sus densidades, diera como resultado un porcentaje de vacíos entre 6 y 8%. (ensayo prueba y error).

Después de la elaboración de las diferentes briquetas, dio como resultado óptimo en porcentaje de vacíos la briketa de 65 golpes por cada cara. Por consiguiente, se continuó con el ensayo, el cual consistía en la elaboración de 6 briquetas y dividir las en dos grupos las cuales al promediar el porcentaje de vacíos de cada grupo fueran iguales.

Un grupo de se nombró muestras secas y el otro, muestras Húmedas.

Las muestras húmedas se saturaron de manera que el volumen de agua estuviera entre un 55 y 80% del volumen de aire. Después de verificar esta saturación, las muestras se acondicionaron en un baño de agua a 60°C durante 24 horas.

Después de las 24 horas se sacaron del baño de agua y se procedieron a sumergirlas en un baño de agua a temperatura ambiente durante media hora junto a los especímenes llamados muestras secas.

Se midieron nuevamente las alturas y se procedió a determinar la carga máxima en el aparato de carga con las franjas metálicas paralelas como se muestra en la siguiente figura.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP



Figura 23 ejecución del ensayo de adherencia
Fuente: propia

Después de determinar la carga máxima, se continuó cargando la maquina hasta fractura del espécimen. Una vez se desmonto del aparato de ensayo, se abrió el espécimen y se estimó visualmente el daño que le causo la humedad como se muestra en la imagen 24.



Figura 24 Briquetas falladas
Fuente: propia

6.4.2 Resistencia a la Deformación Platica; Rueda de Hamburgo.

Para el ensayo de deformación plástica se utilizó el Norma Americana AASTHO T-324 (AASTHO , 2013) la cual tiene como objetivo determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica. La máquina utilizada se llama Rueda de Hamburgo y como

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
su nombre lo dice, esta tiene una rueda con un peso dado por la norma, la cual pasa sobre los especímenes utilizados, simulando el peso de los vehículos que podrían pasar sobre los diseños Marshall utilizados.

Se utilizó una briqueta de 6000gr para poder sacar de ella los dos especímenes utilizados en este ensayo como se muestra en la figura 25.



Figura 25 Briqueta de rueda de Hamburgo

Fuente: propia

Después, se procedió a cortar esta briqueta en dos con mismas dimensiones las cuales se pudieran introducir en un molde para así poder realizar el ensayo.

Siguiendo el paso a paso de la norma, se utilizó un agregado fino para sellar los huecos o espacios entre las briquetas y el molde para no tener desplazamientos horizontales durante el ensayo.

Durante este tiempo la máquina utilizada Rueda de Hamburgo, se llenó de agua con las válvulas cerradas y se empezó el acondicionamiento de esta.

Se introdujeron los especímenes en el agua y se tuvo un tiempo de pre-acondicionamiento.

Los parámetros utilizados en el ensayo fueron; tiempo de pre-acondicionamiento para la briqueta fue de 30 minutos, La temperatura a ensayar las briquetas fue de 50°C y el número de pases fue de 20000 o hasta una deformación mayor a 40,900mm como lo indica la norma utilizada. En la figura 35 se puede observar la muestra lista para ser ensayada.

Después de 7 horas, se retiraron las briquetas de la máquina Rueda de Hamburgo y se pudo inspeccionar de manera visual, la falla que había dejado rueda sobre los especímenes, como se observa en la imagen 26.



Figura 26 Ejecución del ensayo rueda de Hamburgo
Fuente: propia

6.4.3 Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas

La norma utilizada para este ensayo fue la (INVE-749, 2013) y tiene como objetivo determinar los valores del módulo resiliente a briquetas con diferentes temperaturas.

Las temperaturas utilizadas en este ensayo fueron 3 las cuales son las mínimas para la ejecución de este, las cuales fueron; 5°C, 15°C y 25°C.

Para la elaboración de los especímenes se utilizaron tres briquetas de seis mil gramos, a las cuales se les extrajeron tres núcleos y cada una de ellas, brindo 3 briquetas con un diámetro de 101mm y unas alturas de 38.1mm. en la figura 27 se muestra cómo se realizó la extracción de núcleos.



Figura 27 Corte de briquetas para módulos resilientes
Fuente: propia

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Después de esto, fueron tomadas las alturas y diámetros de los especímenes y ubicando con ayuda de un marcador el centro de cada una de ellas.

Se determinó la temperatura de 25°C como la primera temperatura a ensayar, colocando las 3 briquetas dentro de la máquina y esperando la estabilización de temperatura. Cada briqueta fue situada en las bandas de carga de manera que quedaran situadas con su centro en el centro de las bandas para así asegurar un resultado aceptable como se muestra en la siguiente imagen.

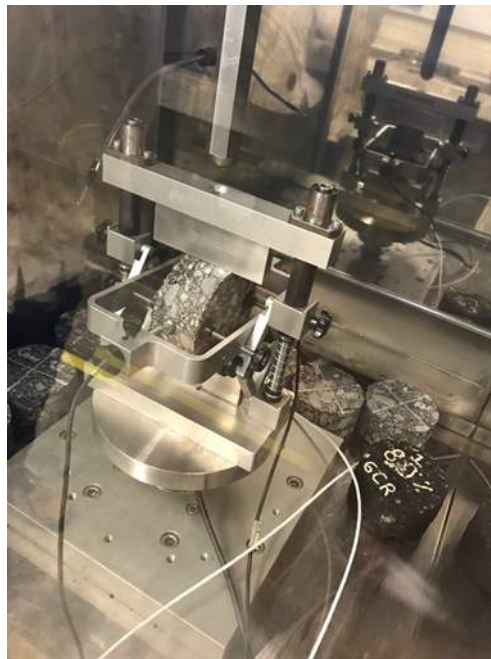


Figura 28 Ejecución del ensayo de módulos resilientes

Fuente: propia

Con ayuda de un monitor se mide la temperatura de la máquina y se empezaba el ensayo, arrojando los valores de cada uno de los especímenes. Después de registrar los resultados se procedió a girar la briqueta a 90° para así poder ser ensayada por todas sus caras.

Se continuó el proceso para las tres temperaturas seleccionadas y al completar este ensayo, se realizó un ensayo de tensión indirecta a 25°C para determinar la resistencia a la tensión del espécimen.

7. RESULTADOS

7.1 Extracción de asfalto por medio de la centrifuga

Este ensayo tiene el fin de determinar el contenido de asfalto que hay en una muestra. luego de ser adicionado el RAP al diseño de mezcla convencional, se procede a realizar el ensayo para determinar cuánto asfalto tenía la muestra en realidad, debido a que el RAP ya viene con un contenido de asfalto en sus propiedades. En la tabla 14, se evidencian los cálculos respectivos.

Tabla 14 Extracción del contenido de asfalto de una mezcla modificada con RAP

INV E-732-13.							
CENTRIFUGA ASALTO OPTIMO 5,2%							
Nº Muestras	Peso inicial (gr)	Peso final (gr)	Peso filtro inicial (gr)	Peso filtro final (gr)	Peso fino retenido en filtro (gr)	Peso total final (gr)	% Asfalto
Muestra 1	1139	1074,0	21	23	2	1076,0	5,5

NOTA: Fuente propia

7.2 Caracterización de los agregados

7.2.1 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y agregados finos

Con el fin de determinar el tamaño máximo nominal para los agregados utilizados en este proyecto (agregado grueso tolva 3/4, tolva 1/2, agregado fino, material fresado RAP), se realizó el ensayo de granulometría establecido en la norma INV E-213. En la tabla 15 se evidencia la granulometría del agregado grueso de la tolva 1/2, en la tabla 16 la granulometría de la tolva 3/4, en la tabla 17 la granulometría de la tolva de finos y por último en la tabla 18 se evidencia la tolva de la granulometría de la tolva del fresado.

Tabla 15 Granulometría agregado grueso (tolva 1/2)

Granulometría de material grueso (Tolva 1/2)			
INV E-213-13.			
TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO	PASA (%)

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	9,4	0,5	0,5	99,5
1/2"	12,7	1298,8	64,9	65,4	34,6
3/8"	9,51	664,2	33,2	98,6	1,4
Nº 4	4,76	26,8	1,3	100,0	0,0
Nº 10	2	0,0	0,0	100,0	0,0
Nº 40	0,42	0,4	0,0	100,0	0,0
Nº 80	0,177	0,2	0,0	100,0	0,0
Nº 200	0,074	0,2	0,0	100,0	0,0
FONDO		0,0	0,0	100,0	0,0

Nota: fuente propia

Tabla 16 *Granulometría agregado grueso (tolva 3/4)*

Granulometría de material grueso (Tolva 3/4)

INV E-213-13.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO			PASA (%)
		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	2614,0	52,3	52,3	47,7
1/2"	12,7	2367,8	47,4	99,6	0,4
3/8"	9,51	17,2	0,3	100,0	0,0
Nº 4	4,76	0,0	0,0	100,0	0,0
Nº 10	2	0,2	0,0	100,0	0,0
Nº 40	0,42	0,2	0,0	100,0	0,0
Nº 80	0,177	0,0	0,0	100,0	0,0
Nº 200	0,074	0,6	0,0	100,0	0,0
FONDO		0,2	0,0	100,0	0,0

Nota: Fuente propia

Tabla 17 *Granulometría agregado fino (tolva fino)*

Granulometría de material grueso (Tolva fino)

INV E-213-13.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO			PASA (%)
		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	0,0	0,0	0,0	100,0
3/4"	19,05	0,0	0,0	0,0	100,0
1/2"	12,7	0,0	0,0	0,0	100,0
3/8"	9,51	0,0	0,0	0,0	100,0
Nº 4	4,76	64,0	12,8	12,8	87,2
Nº 10	2	110,3	22,1	34,9	65,1
Nº 40	0,42	307,0	61,4	96,3	3,7
Nº 80	0,177	18,2	3,6	99,9	0,1

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Nº 200	0,074	0,8	0,1	100,0	0,0
FONDO		0,2	0,0	100,0	0,0

Nota: fuente propia

Tabla 18 *Granulometría del fresado*

Granulometría de material grueso (Tolva Fresado)

INV E-213-13.

TAMIZ	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO			PASA (%)
		PARCIAL (g)	PARCIAL (%)	ACUMULADO (%)	REAL
1"	25,4	70,0	2,8	2,8	97,2
3/4"	19,05	35,0	1,4	4,2	95,8
1/2"	12,7	184,0	7,4	11,6	88,4
3/8"	9,51	258,0	10,4	22,0	78,0
Nº 4	4,76	622,0	25,0	47,0	53,0
Nº 10	2	595,0	23,9	70,9	29,1
Nº 40	0,42	569,0	22,9	93,7	6,3
Nº 80	0,177	88,0	3,5	97,3	2,7
Nº 200	0,074	47,0	1,9	99,2	0,8
FONDO		14,0	0,6	99,7	0,3

Nota: fuente propia

7.2.2 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los ángeles

Para medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos se utilizó este ensayo establecido en la norma INV E 218-13. Con ayuda de la tabla 218-1 de la norma INV E-218-13, se pudo determinar las cantidades necesarias para el desarrollo de este ensayo, teniendo en cuenta que la granulometría es tipo A y el número total de esferas de acero utilizadas fueron 15.

Utilizando la ecuación 1 se pudo calcular el porcentaje de perdidas.

Ecuación 1 Porcentaje de perdidas máquina de los ángeles

$$\% \text{Perdidas} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100$$

Los cálculos realizados para determinar el porcentaje de perdidas en la máquina de los

Ángeles se muestran en la tabla 19.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 19 *Ensayo máquina de los ángeles*

Ensayo Máquina de los Ángeles INV E-218-13.				
Material Nuevo		Material Fresado		
Masa inicial	5007	Masa inicial	5007	g
Masa después de secado	3736	masa después de secado	3736	m
% perdidas	25,3844618	% perdidas	25,3844618	%

Nota: Fuente propia

7.2.3 Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato Micro-Deval.

Para la determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, se utilizó el aparato Micro-Deval. el cual está establecido en la norma INV E-238-13. Los cálculos respectivos se evidencian en la tabla 20 y Utilizando la ecuación 2 se pudo obtener la pérdida por abrasión Micro-Deval.

Ecuación 2 Porcentaje de pérdidas de Micro-Deval

$$\% \text{Pérdidas} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

Donde A es masa inicial y B es masa después del secado.

Tabla 20 *Resultados ensayo Micro-Deval (Agregado nuevo- Material fresado)*

Ensayo Micro-Deval. INV E-238-13.				
Material Nuevo		Material Fresado		
masa inicial	1505	masa inicial	1505	g
masa después secado	1401	masa después secado	1347	m
% perdidas	6,910299	% perdidas	10,50	%

Nota: fuente propia

7.2.4 Determinación del valor del 10% de finos

Con ayuda de este ensayo se evaluó la resistencia mecánica del agregado grueso nuevo sometido a un esfuerzo de compresión.

Para el cálculo de la fuerza F se utilizó la siguiente ecuación:

Ecuación 3 Fuerza F

$$F = \frac{14 \times f}{m+4} \times 100$$

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Donde f es Máxima fuera y m es el porcentaje del material que pasa por el tamiz de

2.36mm a la máxima fuerza ($m = 100 * M1/M2$)

En la tabla 21 se evidencian los respectivos resultados para el ensayo de 10% de finos.

Tabla 21 *Resultados ensayo 10% de finos (Agregado nuevo)*

Ensayo Determinación del valor del 10% de finos.					
INV E-224-13					
Muestra 1 seca			Muestra 1 húmeda		
tiempo	10	min	tiempo	10	min
deformación	20	mm	deformación	20	mm
carga (f)	213,23438	KN	carga (f)	137,78125	N
peso fallado (M1)	2668	gr	peso fallado (M1)	2677,4	gr
peso tamiz #8 retenido	2403,8	gr	peso tamiz #8 retenido	2397	gr
peso del material pasante (M2)	262,6	gr	peso del material pasante (M2)	257	gr
M	9,8426	%	m	9,5989	%
F	215,659	KN	F	141,845	KN
Muestra 2 seca			Muestra 2 húmeda		
Tiempo	10	min	tiempo	10	min
Deformación	20	mm	deformación	20	mm
carga (f)	208,28125	N	carga (f)	128,20313	N
peso fallado (M1)	2668,2	gr	peso fallado (M1)	2740,2	gr
peso tamiz #8 retenido	2397	gr	peso tamiz #8 retenido	2442	gr
peso del material pasante (M2)	269,6	gr	peso del material pasante (M2)	264	gr
M	10,1042	%	m	9,6343	%
F	206,743	KN	F	131,641	KN
Valor 10% finos en seco	211,200988	KN	Valor 10% finos húmedo	136,7434814	KN

Nota: fuente propia

7.2.5 Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio

Los resultados obtenidos en este ensayo nos ayudaron a observar cómo actúan los agregados gruesos y finos, nuevos y del fresado, frente a la acción de la sal en ellos. Las pérdidas fueron de manera mínima, y observando cada agregado, se puede concluir que tan solo una 10% para los agregados nuevos sufren algún desmoronamiento o rotura de ellos por la acción de la sal y un 2% sufre alguna rotura en los agregados gruesos del fresado. La inspección realizada a estos materiales fue de manera visual.

7.2.6 Densidad, Densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso

Para el cálculo de las densidades relativas SH, SSS, Densidad relativa aparente y % absorción, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4 Densidad relativa SH

$$SH = \frac{A}{(B-C)}$$

Ecuación 5 Densidad relativa SSS

$$SSS = \frac{B}{(B-C)}$$

Ecuación 6 Densidad relativa aparente

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A-C)}$$

Ecuación 7 % De absorción

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

Utilizando estas fórmulas se pudo llevar a cabo los respectivos cálculos mostrados en la tabla 22.

Tabla 22 *Resultados ensayo de gravedad específica material nuevo y material fresado*

Gravedad relativa de los GRUESOS				
INV E 223-13				
Material Fresado		Material Nuevo		
Masa del aire de la muestra seca al horno A	2981	Masa del aire de la muestra seca al horno	2981	gr
Masa de la muestra saturada y superficialmente seca B	3011	masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca	3000	gr
masa aparente de la muestra saturada en agua C	1833	masa aparente de la muestra saturada en agua	1849	gr
Densidad relativa SH	2,53	Densidad relativa SH	2,59	
Densidad relativa SSS	2,56	Densidad relativa SSS	2,61	
Densidad relativa Aparente	2,60	Densidad relativa Aparente	2,63	
Densidad aparente	2590,20	Densidad aparente	2626,81	
Absorción	1,01	Absorción	0,64	%

Nota: fuente propia

7.2.7 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras

Se calculó el porcentaje de partículas aplanadas y alargadas de cada grupo utilizado para el desarrollo de este ensayo como se evidencia en la tabla 23 y tabla 24.

Tabla 23 *Resultados ensayo alargamiento (Agregado Nuevo)*

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Ensayo de Alargamiento					
INV E-240-13					
Grupo 1			Grupo 2		
Para tolva de 3/4			Para tolva de 1/2		
Alargadas ¾	80	g	Alargadas 1/2	129	g
no alargadas ¾	2259,8	g	no alargadas 1/2	517	g
	3,42	%		19,97	%
Para tolva de 3/4			Para tolva de 1/2		
Alargadas ½	1290,6	g	Alargadas 3/8	142	g
no alargadas ½	1317,4	g	no alargadas 3/8	190	g
	49,49	%		42,77	%
Alargamiento	26,45	%	Alargamiento	31,37	%

Nota: fuente propia

Tabla 24 *Resultados ensayo aplanamiento (agregado nuevo)*

INV E-240-13		
Para tolva de 3/4		
Aplanamiento	889	g
no aplanadas 3/4	1445,8	g
	38,08	%
Para tolva de 3/4		
Aplanadas /2	58	g
no aplanadas 1/2	2550,6	g
	2,22	%
Aplanamiento	20,15	%

Nota: fuente propia

7.2.8 Densidad, densidad relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino

Para el cálculo de las densidades relativas SH, SSS, Densidad relativa aparente y % absorción, se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Ecuación 8 Densidad relativa SH

$$SH = \frac{A}{(B-C)}$$

Ecuación 9 Densidad relativa SSS

$$SSS = \frac{B}{(B-C)}$$

Ecuación 10 Densidad relativa aparente

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(A-C)}$$

Ecuación 11 % De absorción

$$\% \text{ Absorción} = \frac{B-A}{A} \times 100$$

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Los resultados respectivos para determinar las densidades de los finos se evidencian en la tala

25.

Tabla 25 Resultados ensayo densidad relativa de finos

Gravedad relativa de los finos				
INV E-223-13				
Material Nuevo		Material Fresado		
Masa del picnómetro lleno de agua B	693	Masa del picnómetro lleno de agua B	693	gr
Masa del picnómetro muestra + agua C	1001	Masa del picnómetro muestra + agua C	982	gr
Masa de la muestra seca en horno A	488,8	Masa de la muestra seca en horno A	495	gr
Masa de muestra saturada S	500	Masa de muestra saturada S	500	gr
densidad relativa SH	2,546	densidad relativa SH	2,345971564	
densidad relativa SSS	2,60	densidad relativa SSS	2,369668246	
densidad relativa aparente	2,70	densidad relativa aparente	2,402912621	
absorción %	2,29	absorción %	1,01	%

Nota: fuente propia

7.2.9 Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)

Para el cálculo de angularidad del material fino sin compactar, se utilizó la ecuación 12 y sus respectivos cálculos se encuentran en la tabla 26.

Ecuación 12 Porcentaje de vacíos en el agregado fino sin compactar (u)

$$U = \frac{V - \left(\frac{F}{G}\right)}{V} \times 100$$

Tabla 26 Resultados ensayo densidad relativa de finos falta adicionar esta tabla en la lista de tablas.

Ensayo de determinación del contenido de Vacíos en agregados finos no compactados				
INV E 239-13				
Material Nuevo		Material Fresado		
Peso del cilindro	319	Peso de cilindro	319	gr
Radio del cilindro	1,9415	Radio del cilindro	1,9415	cm
Altura del cilindro	9,08	Altura del cilindro	9,08	cm
Volumen del cilindro (V)	107,5	Volumen del cilindro (V)	107,525262	ml
Gravedad específica del agregado (G)	2,564	Gravedad específica del agregado (G)	2,3459	
Porcentaje de vacíos 1	43,27	Porcentaje de vacíos 1	38,2342887	%
Peso de cilindro + muestra 1	475,4	Peso de cilindro + muestra 1	474,8	gr
Porcentaje de vacíos 2	43,20	Porcentaje de vacíos 2	38,3928656	%
Peso de cilindro + muestra 2	475,6	Peso de cilindro + muestra 2	474,4	

Nota: fuente propia

7.2.10 Equivalente de arena de suelos y agregados finos

El cálculo realizado en este ensayo fue con la aplicación de la ecuación 13 y sus respectivos cálculos se encuentran en la tabla 26.

Ecuación 13 Equivalente de arena (EA)

$$EA = \frac{LECTURA DE ARENA}{LECTURA DE ARCILLA} \times 100$$

Tabla 26 Resultados ensayo equivalente de arena

Equivalente de arena			
INV E-133-13			
Material Nuevo		Material Fresado	
Muestra 1			
lectura de arena	2,5	lectura de arena	3,4
lectura de arcilla	4,7	lectura de arcilla	3,8
EA (%)	53,19	EA (%)	89,5
Muestra 2			
lectura de arena	3,2	lectura de arena	3,4
lectura de arcilla	4,5	lectura de arcilla	3,8
EA (%)	71,11	EA (%)	89,5
EA (%)	62,15130024	EA (%)	89,47

Nota: Fuente propia

7.2.11 Determinación del límite líquido de los suelos y límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

No aplica para este proyecto debido a que no contienen en ellos arcilla.

7.3 Caracterización del asfalto

Para la caracterización del asfalto 60/70 utilizado en este proyecto, se utilizaron los parámetros de la norma INV E-450-13 los cuales se describen a continuación

7.3.1 Ductilidad de los materiales asfálticos

El resultado de este ensayo se reporta como la longitud en centímetros en donde se rompió la muestra según lo indica la norma INV E 702-13 como se muestran en la tabla 27.

Tabla 27 Resultados del ensayo de ductilidad

ENSAYO	Norma	Asfalto	Medida
Ductilidad	INV E-702-13	128	Cm

Nota: Fuente propia

7.3.2 Penetración de los materiales bituminosos

El resultado de este ensayo es el promedio de tres penetraciones mostrado en la tabla 28
Tabla 28 *Resultado de ensayo de penetración*

ENSAYOS	Norma	Asfalto	Medida
Penetración de los materiales Bituminosos	INV E-706-13	63,5	mm

Nota: Fuente propia

7.3.3 Densidad de los materiales bituminosos sólidos y semisólidos (Método del picnómetro)

Tabla 29 *Resultados de gravedad especifica del asfalto*

ENSAYO	Norma	Asfalto	Medida
Peso especifico		0,998	

Nota: Fuente propia

7.3.4 Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland

El resultado de este ensayo es la temperatura en la cual se producen la inflamación y la combustión del material asfáltico, mostrado en la tabla 30

Tabla 30 *Resultados punto de inflamación y de combustión del asfalto*

ENSAYO	Norma	Asfalto	Medida
Punto de inflamación	INV E- 709-13	280	°C
Punto de combustión	INV E- 709-13	340	°C

Nota: Fuente propia

7.3.5 Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)

El resultado de este ensayo es la temperatura en la cual las muestras ubicadas en el anillo descenden y tocan la platina del fondo del aparato de ensayo, mostrados en la tabla 31.

Tabla 31 *Resultados punto de ablandamiento del asfalto*

ENSAYO	Norma	Asfalto	Medida
--------	-------	---------	--------

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Punto de ablandamiento	INV E-712- 13	60	°C
---------------------------	------------------	----	----

Nota: Fuente propia

7.4 Formula de trabajo y dosificación

Para la elaboración de fórmula de trabajo y distribución del material a utilizar en este proyecto, se tuvieron en cuenta los parámetros que se encuentran en la norma (INVE-450, 2013) la cual nos indica una granulometría dependiendo del tipo de material a utilizar y un límite máximo y límite mínimo a la hora de juntar las tres tolvas para el diseño de mezcla convencional y las cuatro tolvas para el diseño de mezcla con adición del fresado. En las tablas 33 y 32 se evidencia la dosificación utilizada para los diseños convencionales y con adición de fresado respectivamente.

Tabla 32 *Dosificación de tolvas para formula de trabajo (Agregado nuevo)*

TAMIZ		% En peso que pasa			Dosificación			Granulometría	Límite Máximo	Límite Mínimo
UNE	ASTM	Tolva 3/4	Tolva 1/2	Tolva Finos	1	2	3	OBTENIDA		
		0/4(1)	4/8(2)	6/12(3)	22,0%	8,0%	70,0%	100,0%		
25,4	1"	100,0	100,0	100,0	22,0	8,0	70,0	100,0	100	100
19,05	3/4"	47,7	99,5	100,0	10,5	8,0	70,0	88,5	95	80
12,7	1/2"	0,4	34,6	100,0	0,1	2,8	70,0	72,8	80	65
9,51	3/8"	0,0	1,4	98,1	0,0	0,1	68,7	68,8	70	55
4,76	N°4	0,0	0,0	74,6	0,0	0,0	52,2	52,2	55	40
2	N° 10	0,0	0,0	51,0	0,0	0,0	35,7	35,7	38	24
0,42	N° 40	0,0	0,0	18,9	0,0	0,0	13,2	13,2	20	9
0,177	N° 80	0,0	0,0	9,0	0,0	0,0	6,3	6,3	12	6
0,074	N° 200	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0	3,12	3,12	7	3

Nota: Fuente propia

Tabla 33 *Dosificación de tolvas para formula de trabajo (material fresado)*

TAMIZ		% En peso que pasa				Cernido Ponderal x % en peso que pasa				Granulometría	Límite Máximo	Límite Mínimo
UNE	ASTM	1	2	3	4	1	2	3	4	OBTENIDA		
		0/4(1)	4/8(2)	6/12(3)	12/20(4)	22,0%	8,0%	60,0%	10%	100,0%		
25,4	1"	100,0	100,0	100,0	97,2	22,0	8,0	60,0	9,7	99,7	100	100
19,05	3/4"	47,7	99,5	100,0	95,8	10,5	8,0	60,0	9,6	88,0	95	80
12,7	1/2"	0,4	34,6	100,0	88,4	0,1	2,8	60,0	8,8	71,7	80	65
9,51	3/8"	0,0	1,4	98,1	78,0	0,0	0,1	58,9	7,8	66,8	70	55
4,76	N°4	0,0	0,0	74,6	53,0	0,0	0,0	44,8	5,3	50,1	55	40
2	N° 10	0,0	0,0	51,0	29,1	0,0	0,0	30,6	2,9	33,5	38	24
0,42	N° 40	0,0	0,0	18,9	6,3	0,0	0,0	11,3	0,6	12,0	20	9
0,177	N° 80	0,0	0,0	9,0	2,7	0,0	0,0	5,4	0,3	5,7	12	6

Nota: Fuente propia

- La dosificación para el diseño Marshall convencional se distribuyó en un veintidós por ciento para la tolva de 3/4, un ocho por ciento para la tolva de 1/2 y un setenta por ciento restante para la tolva de finos, teniendo así un cien por ciento de materiales y cumpliendo con los límites máximos y mínimos que la norma (INVE-450, 2013) exige.
- La dosificación para el diseño Marshall con adición de fresado se distribuyó en un veintidós por ciento para la tolva de 3/4, un ocho por ciento para la tolva de 1/2 y un sesenta por ciento para tolva de finos y un diez por ciento restante para la tolva del material fresado, teniendo así un cien por ciento de materiales y cumpliendo con los límites máximos y mínimos que la norma (INVE-450, 2013) exige

El grafico correspondiente a cada uno de los diseños (convencional y modificado con adición de fresado) respectivamente son:

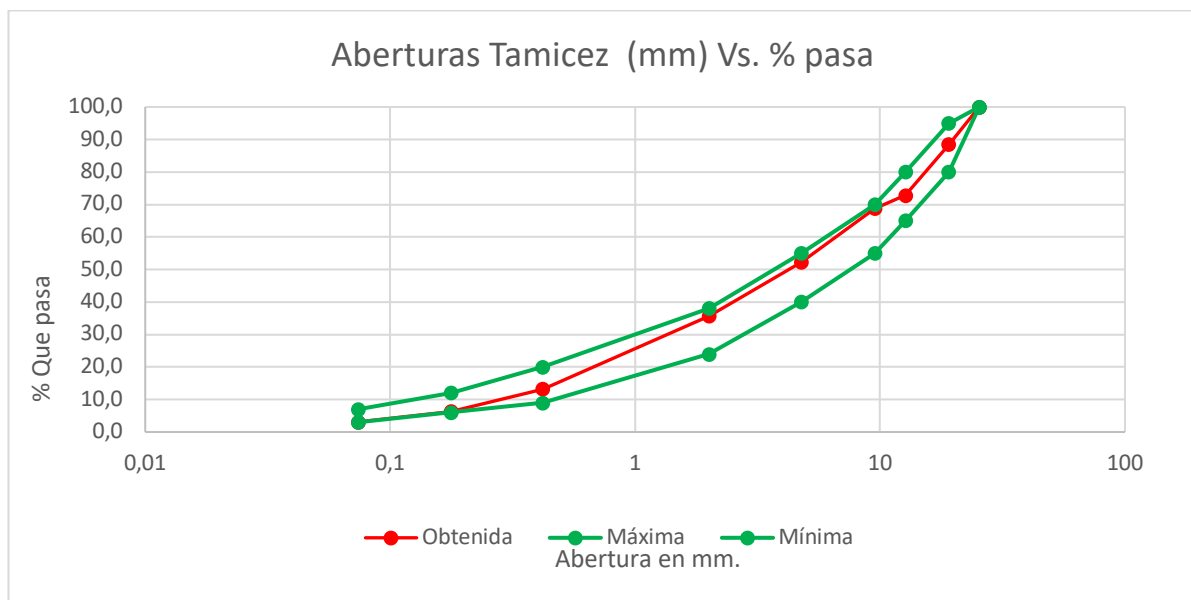


Gráfico 1 Grafico de Abertura Vs % pasa para diseño Marshall Convencional

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

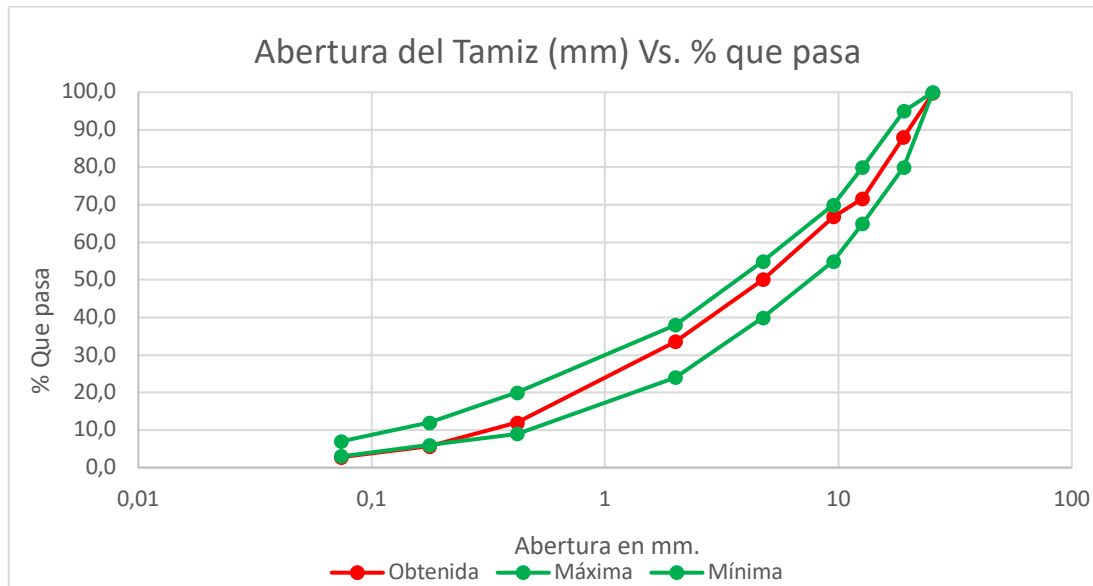


Gráfico 2 Grafico de Abertura Vs % pasa para diseño Marshall modificado con adición de fresado

Nota: Fuente propia

7.5 Diseño Marshall convencional MSC-25 y diseño Marshall con adición de fresado MSC-25

7.5.1 Cantidades del material

Teniendo en cuenta la fórmula de trabajo, dosificación de diseño se pudo llevar a cabo la elaboración de las briquetas con un peso inicial de 1200gr por cada briketa incluyendo el porcentaje de asfalto.

Se realizaron 3 briquetas por cada porcentaje de asfalto. Iniciando para el diseño Marshall convencional desde 3,5% aumentando de a 0,5% y llegando hasta a 6,5% de asfalto e iniciando de 3% hasta un 6% de asfalto, para así poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto de cada uno de los diseños que realizaron en el proyecto.

La distribución completa del material utilizado para cada briketa se encuentra en Anexo 1. Y en la tabla 34 y tabla 35 se evidencian unos ejemplos de la distribución del material para una briketa de 1200Gramos.

Tabla 34 *Ejemplo de distribución de material para una briketa de 1200g en diseño Marshall con adición de fresado*

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Peso total	1200 g			
3,5%	42 g			
Peso agregado	1158 g			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	254,76	92,64	694,8	115,8
Para 3 briquetas	764,28	277,92	2084,4	347,4

Nota: Fuente propia

Tabla 35 *Ejemplo de distribución de material para una briqueta de 1200g en diseño Marshall convencional*

Peso total	1200 g		
3,5%	42 g		
Peso agregado	1158 g		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	254,76	92,64	810,6
Para 3 briquetas	764,28	277,92	2431,8

7.5.2 Estabilidad y flujo

Las briquetas utilizadas en el ensayo de estabilidad y flujo fueron 18, tres por cada punto mínimas requeridas por la Norma INV E 450-13.

Se realizó la toma de diámetros y alturas para cada una de las briquetas a utilizar, siguiente a esto se realizó la toma de densidad Bulk para cada una de las briquetas.

Los datos arrojados por este ensayo fueron vitales para la toma de decisión del porcentaje óptimo, tanto para el diseño Marshall msc-25 convencional como para el diseño Marshall MSC-25 modificado con adición de fresado. Los resultados se muestran a continuación en la tabla 36 y tabla 37

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 36 Pesos (agua, aire, húmedo), Estabilidad, flujo y Gravedad específica de Diseño Marshall Convencional

% Asfalto	Espesor (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)			Estabilidad Corregida (KN)	Flujo (mm)	Estabilidad/Flujo	Gravedad Específica BULK
			Aire	Agua	Húmedo				
3,5	6,566	10,144	1165,4	653,4	1174,5	12,306	3,562	3,455	2,236
3,5	6,818	10,162	1155,5	628,8	1167,1	11,543	3,066	3,765	2,147
3,5	6,791	10,165	1165,6	648	1178,9	13,580	3,337	4,070	2,196
						12,476	3,322	3,763	2,193
4,0	6,729	10,151	1159,1	641,6	1171	13,118	2,525	5,195	2,189
4,0	6,778	10,161	1163,2	645,5	1172,9	12,236	2,998	4,081	2,206
4,0	6,713	10,143	1149,1	636,5	1158	12,166	3,335	3,648	2,203
						12,507	2,953	4,308	2,199
4,5	6,635	10,159	1164,9	650,3	1174,3	15,491	3,105	4,989	2,223
4,5	6,6	10,142	1164,9	650,2	1172,2	16,681	3,296	5,061	2,232
4,5	6,657	10,132	1159,5	646,3	1166,7	16,058	4,004	4,010	2,228
						16,077	3,468	4,687	2,228
5,0	6,498	10,18	1151,1	641,8	1157,3	16,555	3,389	4,885	2,233
5	6,474	10,229	1165,6	652,8	1171,2	16,856	3,263	5,166	2,248
5,0	6,591	10,156	1164,6	649,1	1170,9	17,150	3,323	5,161	2,232
						16,854	3,325	5,071	2,238
5,5	6,428	10,158	1163	657,7	1167,2	17,150	3,470	4,942	2,283
5,5	6,496	10,36	1166,8	657,5	1171,6	18,886	3,666	5,152	2,270
5,5	6,387	10,151	1143,9	646,7	1170,9	18,599	3,336	5,575	2,182
						18,212	3,491	5,223	2,245
6,0	6,411	10,212	1161,4	658	1164,6	19,180	3,138	6,112	2,293
6,0	6,49	10,125	1150,2	649,6	1155,8	17,507	3,804	4,602	2,272
6,0	6,367	10,18	1170,6	665,5	1172,7	18,739	3,804	4,926	2,308
						18,475	3,582	5,214	2,291
6,5	61,665	10,183	1161,9	664,4	1163,1	13,559	3,517	3,855	2,330
6,5	64,637	101,045	1153,8	655,6	1159,1	11,662	4,438	2,628	2,292
6,5	63,57	101,47	1161,6	660,5	1163,8	11,879	3,371	3,524	2,308

Nota: fuente propia

Tabla 37 Pesos (agua, aire, húmedo), Estabilidad, flujo y Gravedad específica de Diseño Marshall Modificado con Adición de fresado.

% asfalto	espesor cm	Diámetro cm	peso gramos			estabilidad (KN) corregida	flujo (mm)	ESTABILIDAD / FLUJO	Gravedad específica bulk
			aire	agua	húmedo				
B	c		d	e	s	q	r		
3,5	6,62	10,12	1162,7	643,4	1169	22,62	3,257	6,945	2,211
3,5	6,73	10,12	1168,6	643,2	1178	18,21	3,756	4,848	2,187
3,5	6,68	10,15	1176,9	652,3	1186	18,2	3,91	4,655	2,204

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

						19,676667	3,641	5,483	
4	6,6	10,13	1169,5	652	1176	20,38	3,643	5,594	2,232
4	6,66	10,14	1175,2	658,9	1185	19,88	4,368	4,551	2,236
4	6,638	10,12	1166,1	649,8	1175	18,1	3,436	5,268	2,222
						19,453333	3,816	5,138	
4,5	0	0	0	0	0				
4,5	6,609	10,14	1160,4	646,6	1168	22,07	2,759	7,999	2,226
4,5	6,66	10,13	1162,7	636,2	1168	20,6	2,693	7,649	2,188
						21,335	2,726	7,824	
5	6,47	10,13	1158,4	652,8	1166	22,09	3,701	5,969	2,259
5	6,627	10,12	1165,4	659,3	1174	22,45	3,369	6,664	2,265
5	6,49	10,11	1166,8	659,8	1175	21,49	3,371	6,375	2,266
						22,01	3,48	6,336	
5,5	6,55	10,13	1163	652	1171	19,7	3,323	5,928	2,241
5,5	6,622	10,11	1156	642,4	1165	19,8	3,423	5,784	2,213
5,5	6,55	10,07	1149,3	638,2	1157	21,23	2,43	8,737	2,215
						20,243333	3,059	6,816	
6	6,43	10,13	1158,8	654,7	1166	21,14	3,103	6,813	2,266
6	6,54	10,15	1170,5	662,8	1177	23,87	3,871	6,166	2,275
6	6,45	10,14	1170,3	662,1	1176	24,37	3,21	7,592	2,276
						23,126667	3,395	6,85	

Nota: Fuente propia

7.5.3 GMM y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall convencional y modificado con adición de fresado.

Los cálculos realizados a para determinar el Gse, Gmm, porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall convencional y modificado con adición de fresado, se utilizaron las diferentes fórmulas que se muestran a continuación, contempladas en diferentes normal del INV 13

Para determinación de Gmm se necesitó un Gse para cada porcentaje de asfalto, el cual se halló con la fórmula de la norma INV E 799-13

Los resultados de Gse y Gmm se muestran a continuación en la tabla 38 y tabla 39.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Tabla 38 *Resultados Gmm y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall convencional*

GMM	% VACÍOS CON AIRE	Asfalto Absorbido	Contenido de Asfalto Efectivo (Pbe)	VAM	VFA	RELACIÓN LLENANTE/LIGANTE
2,512	0,110	1,460	2,091	15,642	99,299	1,492
2,512	0,145	1,460	2,091	19,031	99,236	1,492
2,512	0,126	1,460	2,091	17,184	99,267	1,492
2,532	0,135	2,116	1,969	17,841	99,242	1,585
2,532	0,129	2,116	1,969	17,238	99,252	1,585
2,532	0,130	2,116	1,969	17,316	99,251	1,585
2,469	0,100	1,394	3,169	17,013	99,415	0,985
2,469	0,096	1,394	3,169	16,695	99,424	0,985
2,469	0,098	1,394	3,169	16,827	99,420	0,985
2,466	0,094	1,662	3,421	17,081	99,448	0,912
2,466	0,088	1,662	3,421	16,506	99,467	0,912
2,466	0,095	1,662	3,421	17,121	99,447	0,912
2,469	0,075	2,045	3,567	15,683	99,520	0,875
2,469	0,081	2,045	3,567	16,164	99,502	0,875
2,469	0,116	2,045	3,567	19,393	99,402	0,875
2,405	0,047	1,235	4,840	15,765	99,705	0,645
2,405	0,055	1,235	4,840	16,512	99,667	0,645
2,405	0,040	1,235	4,840	15,198	99,736	0,645
2,355	0,010	0,624	5,917	14,849	99,930	0,527
2,355	0,027	0,624	5,917	16,249	99,835	0,527
2,355	0,020	0,624	5,917	15,649	99,874	0,527

Nota: fuente propia

Tabla 39 *Resultados Gmm y Porcentaje de vacíos, asfalto absorbido, VAM, VFA, relación llenante ligante y porcentaje óptimo para diseño Marshall modificado*

GMM	% VACIOS CON AIRE	Asfalto absorbido	Contenido de asfalto efectivo (Pbe)	VAM	VFA	RELACION LLENANTE / LIGANTE EFECTIVO
2,482	10,907	2,921	0,681	16,210	32,718	4,714
2,482	11,896	2,921	0,681	17,140	30,599	4,714
2,482	11,187	2,921	0,681	16,474	32,093	4,714

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

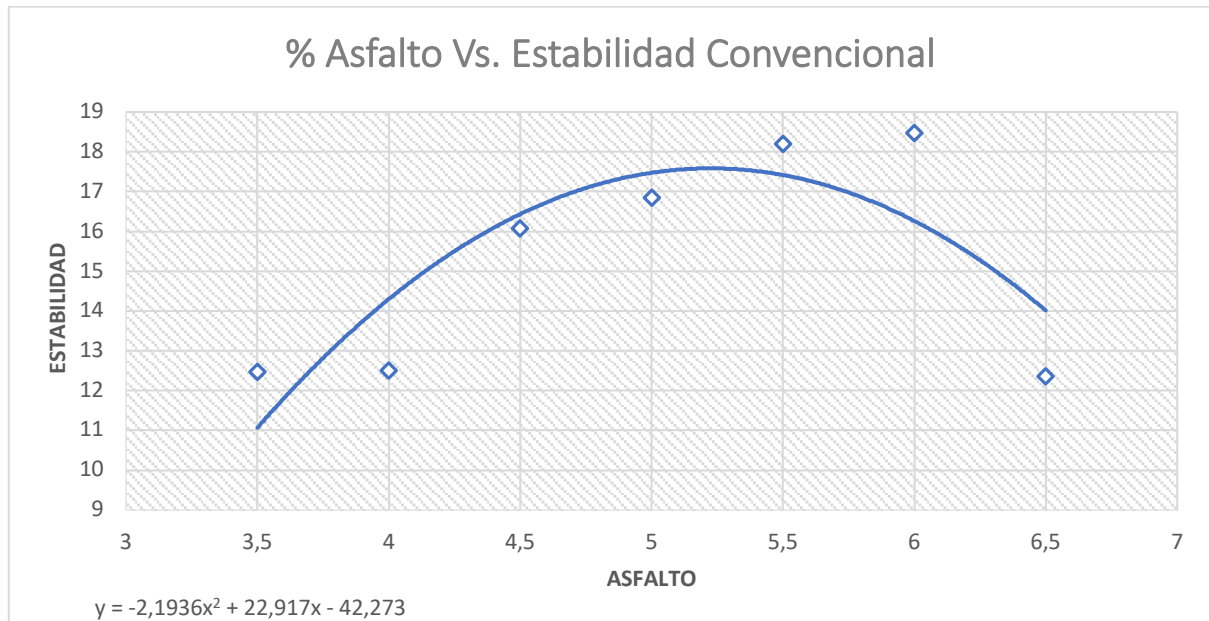
2,45598	9,108	2,609	1,495	15,853	42,548	2,147
2,45598	8,960	2,609	1,495	15,716	42,988	2,147
2,45598	9,527	2,609	1,495	16,241	41,339	2,147
2,4331	8,495	2,416	2,193	16,512	48,551	1,464
2,4331	10,091	2,416	2,193	17,968	43,840	1,464
2,4328	7,145	3,231	1,931	15,734	54,588	1,663
2,4328	6,893	3,231	1,931	15,505	55,545	1,663
2,4328	6,871	3,231	1,931	15,486	55,628	1,663
2,4003	6,643	2,565	3,076	16,850	60,576	1,044
2,4003	7,791	2,565	3,076	17,873	56,408	1,044
2,4003	7,725	2,565	3,076	17,814	56,635	1,044
2,367	4,270	1,818	4,291	16,364	73,908	0,748
2,367	3,867	1,818	4,291	16,012	75,850	0,748
2,367	3,827	1,818	4,291	15,978	76,046	0,748

Nota: fuente propia

Los cálculos realizados para la determinación del GMM de cada uno de los porcentajes de asfalto utilizados para la determinación del porcentaje óptimo, tanto como del convencional como del modificado con adición de fresado se encuentran en los anexos 3 Y 4.

Los resultados mostrados en la tabla 36, tabla 37, tabla 38 y tabla 39 nos ayudaron para la determinación del porcentaje óptimo de del diseño Marshall convencional y Diseño Marshall modificado. Graficando el % de asfalto Vs. Estabilidad (Grafico 3 - Grafico 4), % asfalto Vs. Flujo (Grafico 5 - Grafico 6), % Asfalto Vs % Vacíos (Grafico 7- Grafico 8).

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP



Nota: fuente propia

Gráfico 3 % asfalto Vs Estabilidad, Diseño Marshall convencional

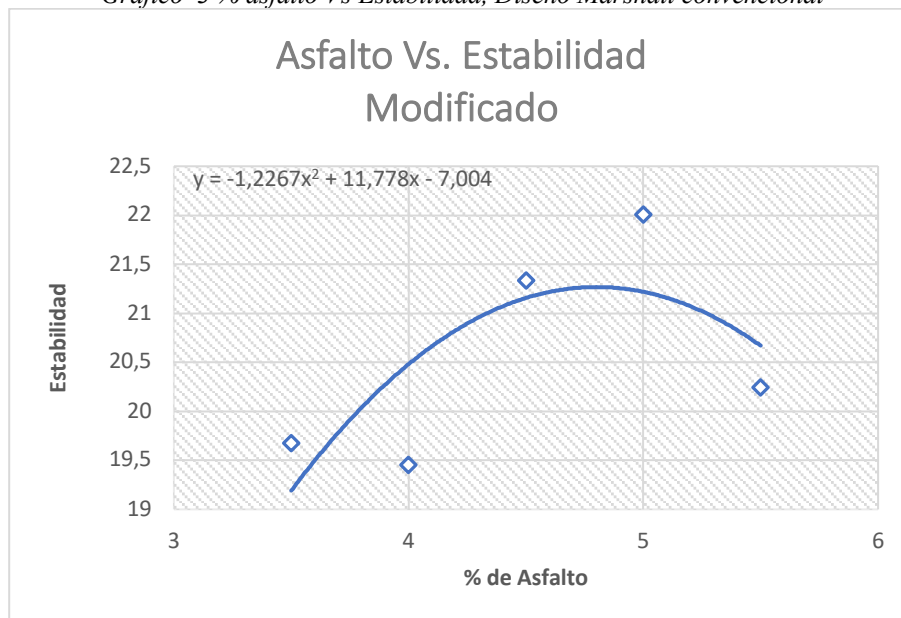


Gráfico 4 % asfalto Vs Estabilidad, Diseño Marshall modificado con adición de fresa

Nota: fuente propia

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

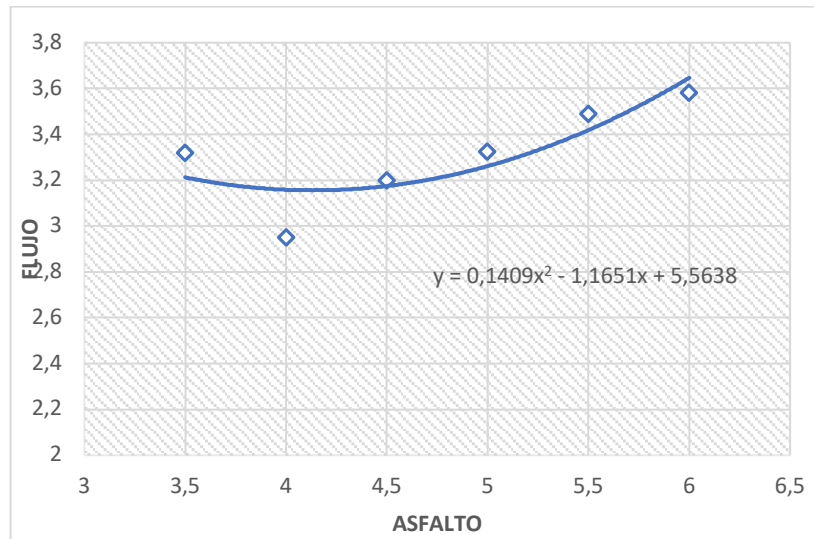


Gráfico 5% asfalto Vs flujo, Diseño Marshall convencional

Nota: fuente propia

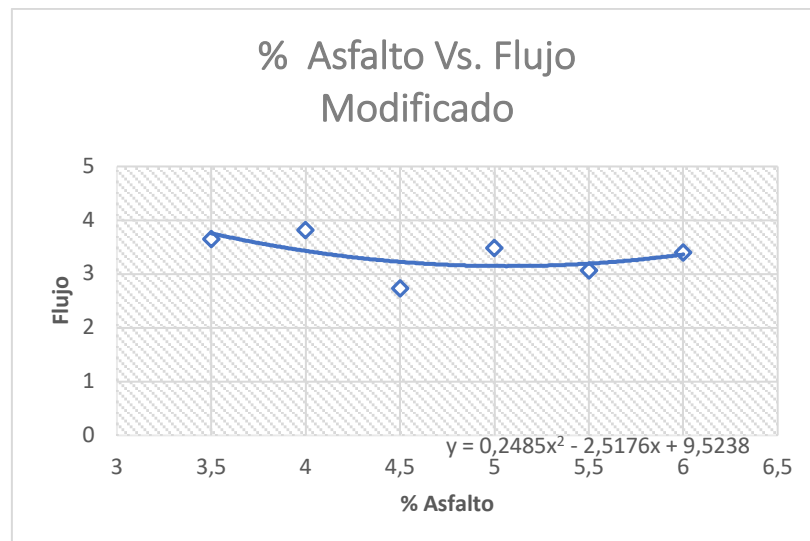


Gráfico 6 % asfalto Vs flujo, Diseño Marshall Modificado con adición de fresado

Nota: fuente propia

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

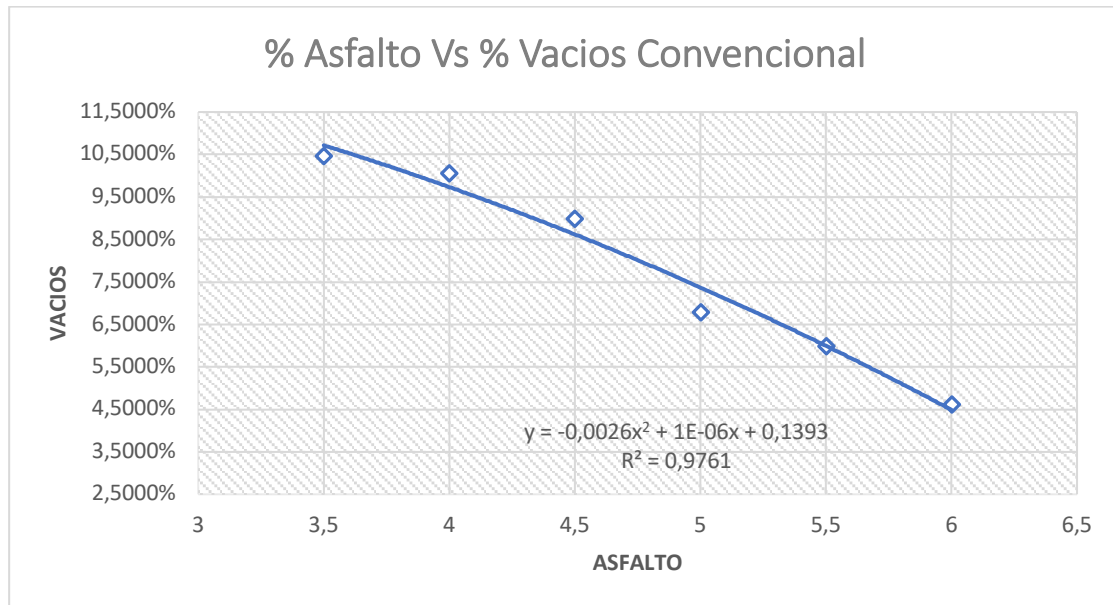


Gráfico 7% asfalto Vs % Vacios, Diseño Marshall convencional

Nota: fuente propia

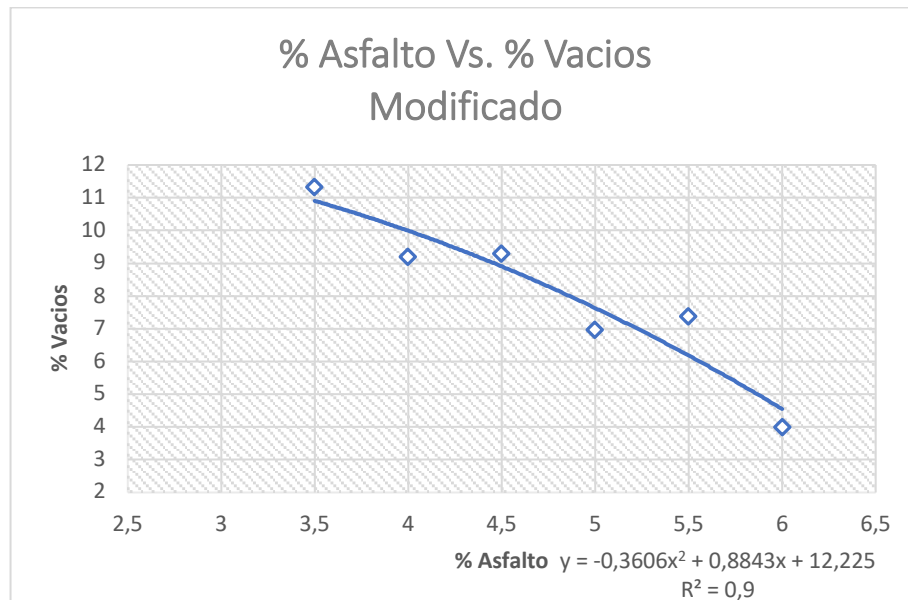


Gráfico 8% asfalto Vs % Vacios, Diseño Marshall modificado con adición de fresado

Nota: fuente propia

- El porcentaje óptimo de asfalto para el diseño Marshall convencional con ayuda de las gráficas y sus ecuaciones, es de 5.6%.
- El porcentaje óptimo de asfalto para el diseño Marshall Modificado con adición de fresado con ayuda de las gráficas y sus ecuaciones, es de 5.2%.

7.5.4 Evaluación de la susceptibilidad al agua de mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta

Para el cálculo de porcentaje de saturación se utilizó la fórmula planteada en la norma INV E-725-13 y en la tabla 40 y tabla 41 se muestran los resultados de adherencia en el diseño Marshall convencional y modificado respectivamente.

Ecuación 14 % de saturación

$$\% \text{ SATURACION} = \frac{V_{wa}}{V_a} \times 100$$

Tabla 40 Resultados Adherencia diseño Marshall convencional

N.º Briqueleta	Diámetro	Altura	Aire	Agua	Húmedo	Densidad Bulk	Volumen del Espécimen	% de vacíos con aire	Húmedo después de vacíos	Va volumen de vacíos con aire	Volumen del agua absorbida (Vwa)	Saturación
1 seca	10,125	6,475	1157	656	1161,4	2,28741	521,3384	7,662%		0,39947	4,2	
3 seca	10,1	6,725	1144	648	1148,4	2,2876	538,7967	7,655%		0,41242	4,6	
8 seca	10,1	6,525	1165	660	1169,5	2,28333	522,773	7,827%		0,40916	5	
4 húmeda	10,128	6,4363	1170	662	1172,5	2,29381	518,5323	7,404%	1196	0,38392	25,7	66,9408
6 húmeda	10,2013	6,403	1170	660	1172,5	2,28304	523,344	7,839%	1199	0,41023	29,4	71,66647
7 húmeda	10,1397	6,4257	1167	658	1169,4	2,28253	518,8663	7,859%	1179	0,40779	29,4	72,09548

Tabla 41 Resultados Adherencia diseño Marshall modificado con adición de fresado

Nº Briqueleta	Diámetro	Altura	Aire	Agua	Húmedo	Densidad Bulk	Volumen del Espécimen	% de vacíos con aire	Va volumen de vacíos con aire	Volumen del agua absorbida (Vwa)	Saturación
3 seca	10,15	6,54	1153,10	649,20	1163,30	2,24	529,18	6,35	33,59	10,20	30,36
4 seca	10,16	6,39	1154,20	647,40	1161,70	2,24	518,06	6,30	32,61	7,50	23,00
5 seca	10,13	6,41	1136,30	641,30	1146,90	2,25	516,61	6,16	31,83	10,60	33,30
6 húmeda	10,15	6,57	1149,90	641,50	1160,50	2,22	531,60	7,49	39,82	10,60	26,62
7 húmeda	10,11	6,48	1142,30	644,10	1151,90	2,25	520,20	6,07	31,60	9,60	30,38
8 húmeda	10,17	6,52	1167,70	654,40	1176,80	2,24	529,64	6,67	35,32	9,10	25,76

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Para los cálculos de la resistencia a la tensión, relación resistencia a la tensión, se calcularon después de dejar las briquetas húmedas en un baño María a 24 horas y posterior a esto ser falladas. Se utilizaron las ecuaciones plasmadas en la norma ya mencionada y los cálculos se muestran en la tabla 42 para diseño convencional y tabla 43 para diseño modificado.

Ecuación 15 Resistencia a la tensión

$$Rt = \frac{2000 \times P}{PI \times t \times D}$$

Ecuación 16 RTT, resistencia a la tensión

$$RRT = \frac{Rth}{Rts} \times 100$$

Tabla 42 *Resultados Adherencia (RT, RRT) diseño Marshall convencional*

Altura de los especímenes en condiciones Húmedas	Volumen del Espécimen en condiciones Húmedas	Peso del espécimen después de 24 Horas	Va volumen de vacíos con aire	Volumen de agua absorbida	SATURACION DESPUES DE 24 HORAS	Carga Máxima (N)	RT Resistencia a la tensión kPa	PROMEDIO	RRT
6,389	203,2253091					13,83	134,2974	133,88508	80,2
6,3246667	200,682216					13,56	127,0943		
6,4393333	204,3205992					14,52	140,2636		
6,4363333	204,7915784	1196	0,151628	25,7	16949,4114	11,555	112,8464	107,3944	
6,403	205,206122	1199	0,160855	29,4	18277,3393	9,368	91,30332		
6,4256667	204,6876988	1196	0,16087	29,4	18275,6032	12,08	118,0335		

Nota: fuente propia

Tabla 43 *Resultados Adherencia (RT, RRT) diseño Marshall Modificado con adición de fresado*

Altura de los especímenes en condiciones Húmedas	Volumen del Espécimen en condiciones Húmedas	Peso del espécimen después de 24 Horas	Va volumen de vacíos con aire	Volumen de agua absorbida	SATURACION DESPUES DE 24 HORAS	Carga Máxima (N)	RT Resistencia a la tensión kPa	PROMEDIO	RRT
6,54	208,54206					9,687	92,902122	95,562742	82,8
6,39	203,95973					9,525	93,400788		
6,41	203,99398					10,239	100,38532		
6,5	207,26658	1182,5	15,5241	32,6	209,99662	8,981	86,661344	79,1719	
6,4	203,27361	1170,4	12,3477	28,1	227,57213	7,312	71,942442		

6,5 207,67498 1193,7 13,8505 26 187,71929 8,194 78,911768

Nota: fuente propia

7.5.5 Resistencia a la deformación Plástica de las mezclas asfálticas mediante la rueda de Hamburgo

El grafico mostrado en grafico 9. Muestra la deformación Vs el tiempo Del diseño Marshall convencional y en el grafico 10 Se muestra la deformación Vs el tiempo Del diseño Marshall Modificado en el cual se efectuó todo el ensayo. La norma por la cual se rigió este ensayo fue AASHTO T-324 la cual dice que el número total de pases es de 20000 o hasta una deformación mayor a 40,90mm

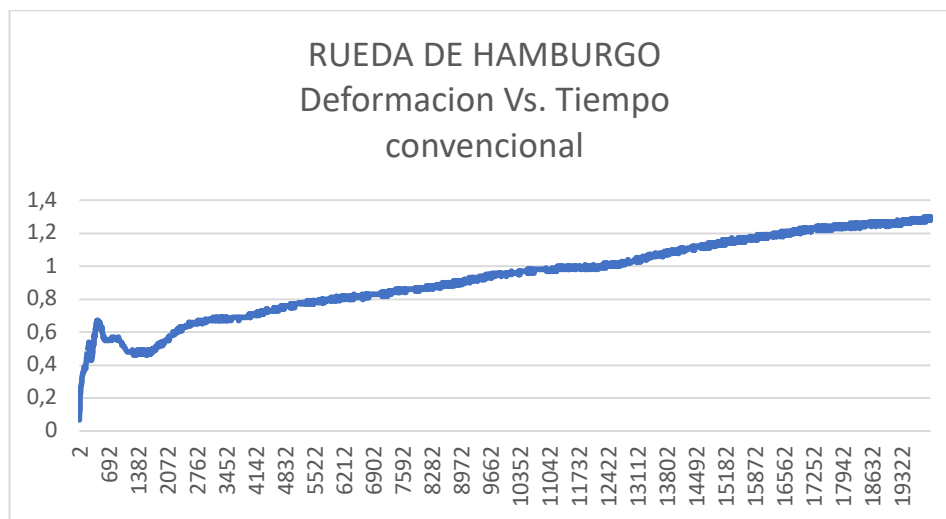


Gráfico 9 Rueda de Hamburgo mezcla convencional

Nota: fuente propia

- Como se observa la deformación final de la muestra ensayada en la Rueda de Hamburgo fue de 1,2mm

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

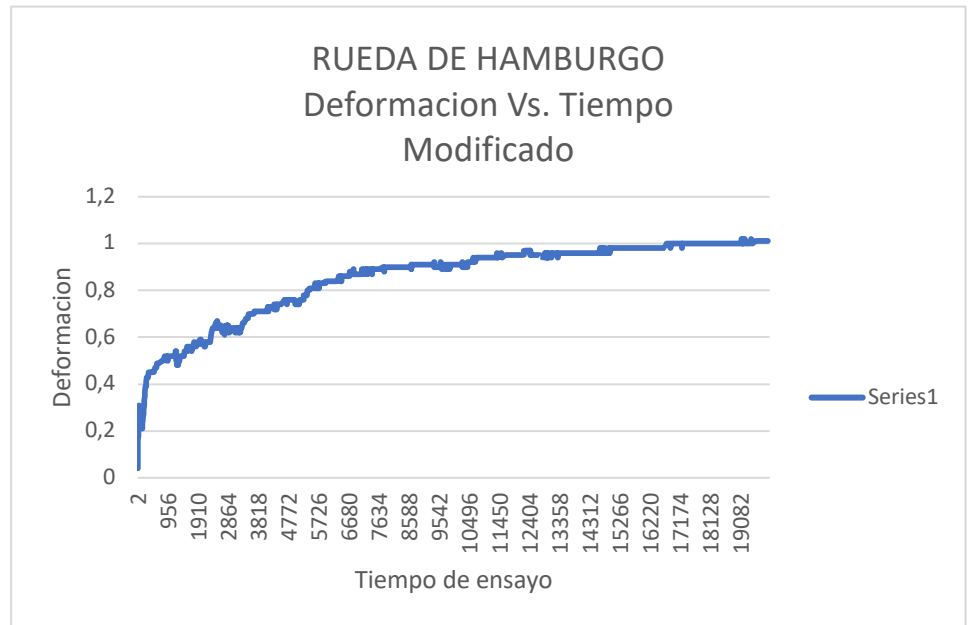


Gráfico 10 Rueda de Hamburgo mezcla modificada

Nota: fuente propia

- Como se observa en el grafico de Deformación Vs. Tiempo del diseño Marshall Modificado, la deformación final de la muestra ensayada fue de 1,01 mm

7.5.6 Ensayo de tracción indirecta para determinar los módulos resilientes de mezclas asfálticas

El ensayo de módulos resilientes se emplea para evaluar el comportamiento y la calidad relativa de los materiales bajo los efectos de diferentes temperaturas tales como 5, 25 y 40°C. Cada una de las temperaturas cuenta con tres briquetas de ensayo, la cuales a su vez se someten a dos cargas cada una, la primera es acomodando la briqueleta de cualquier manera en la máquina y la segunda es girando la briqueleta 90° de su posición inicial, teniendo así, dos módulos por briqueleta, promediándolos entre sí para tener un solo resultado y promediando el resultado de las tres briquetas para de esta manera obtener un promedio de modulo resiliente por temperatura como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 44 *Resultados módulos a 5°C*

	TEMPERATURA 5°C	
	CONVECIONAL	MODIFICADO
MODULO 1	15844	15082
MODULO 2	24479,5	19187
MODULO 3	21258	10053

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

PROMEDIO	20527,1	14774
-----------------	---------	-------

Nota: fuente propia

Tabla 45 Resultados módulos a 25°C

TEMPERATURA 25°C		
	CONVECIONAL	MODIFICADO
MODULO 1	6622	6565,5
MODULO 2	6684,5	4196,5
MODULO 3	3488,5	5351
PROMEDIO	5598,3	5371

Nota: fuente propia

Tabla 46 Resultados módulos a 40°C

TEMPERATURA 40°C		
	CONVECIONAL	MODIFICADO
MODULO 1	2888,5	1852
MODULO 2	2231,5	FALLO
MODULO 3	FALLO	1352
PROMEDIO	2560	1602

8. ANALISIS DE RESULTADOS

8.1 Estabilidad y flujo Marshall

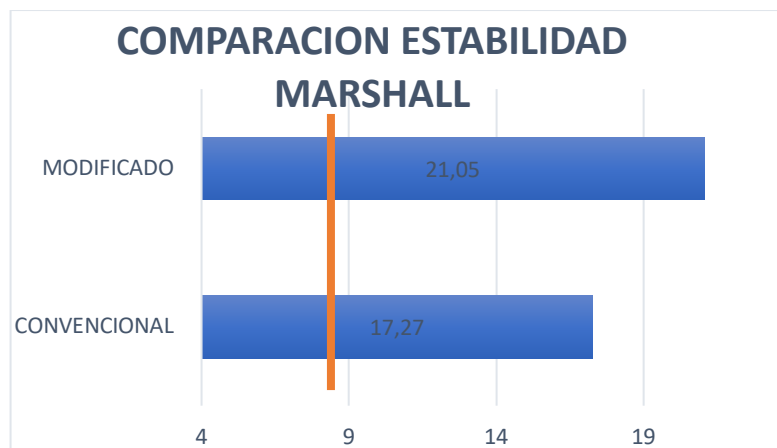


Gráfico 11 Estabilidad Marshall

Nota: fuente propia

Teniendo en cuenta que la estabilidad es la capacidad que tiene una mezcla asfáltica para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito la norma INV E 450-13 exige el cumplimiento de una estabilidad mínima de 5,000 Newtons según la tabla 450-10. Como se puede observar en la gráfica anterior donde se compara la estabilidad del diseño

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP Marshall convencional con la estabilidad del diseño Marshall modificado con RAP, la estabilidad de cada mezcla cumple con el mínimo exigido por la norma, siendo el diseño modificado con RAP el que tiene mayor estabilidad, lo que quiere decir, que esta mezcla tiene mayor resistencia a las deformaciones que le puedan generar las cargas de tránsito.

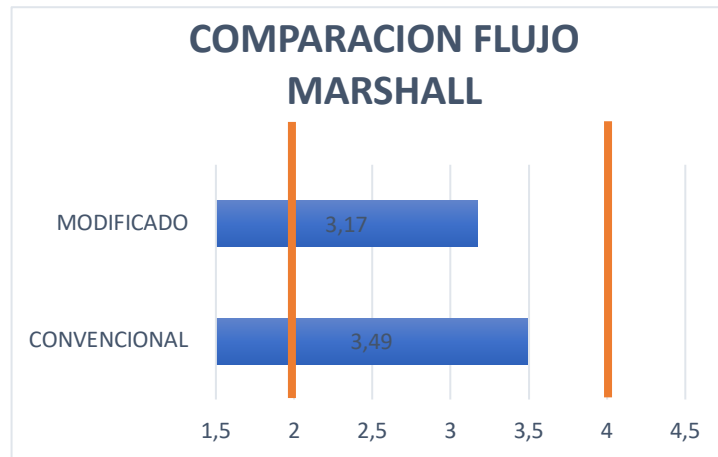


Gráfico 12 Flujo Marshall

Nota: fuente propia

El flujo es la deformación expresada en mm que sufre la briqueta desde el comienzo de la aplicación de la carga hasta cuando falla la misma la cual según la norma INV E 450-13 nos brinda un rango mínimo y máximo entre 2 mm y 4 mm. Como se puede observar en la gráfica anterior, las dos mezclas cumplen con lo exigido en la norma, siendo el diseño de mezcla modificada con RAP la que sufre menos deformaciones.

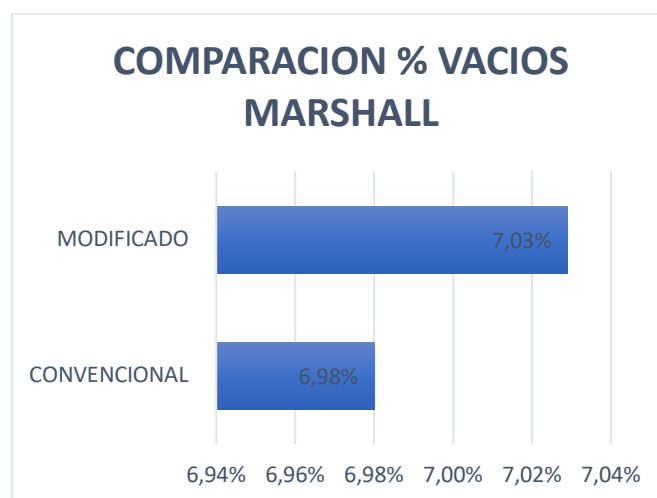


Gráfico 13 Porcentaje de vacíos

Nota: fuente propia

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Un incremento en el porcentaje de vacíos en una mezcla asfáltica representa un alto nivel de porosidad en las partículas de los agregados, además que, muchas veces se generan por un nivel de compactación deficiente o la mezcla a compactar no se encuentre a una temperatura superior de 150°C. En este caso, el diseño de mezcla convencional fue compactado a una temperatura de 180°C y el diseño de mezcla modificado a 160°C, aunque los dos cumplen con la temperatura mínima de compactación, la diferencia de 20°C es la causante de que el diseño de mezcla modificado con RAP contenga un porcentaje de vacíos más alto respecto al diseño de mezcla convencional.

8.2 Adherencia

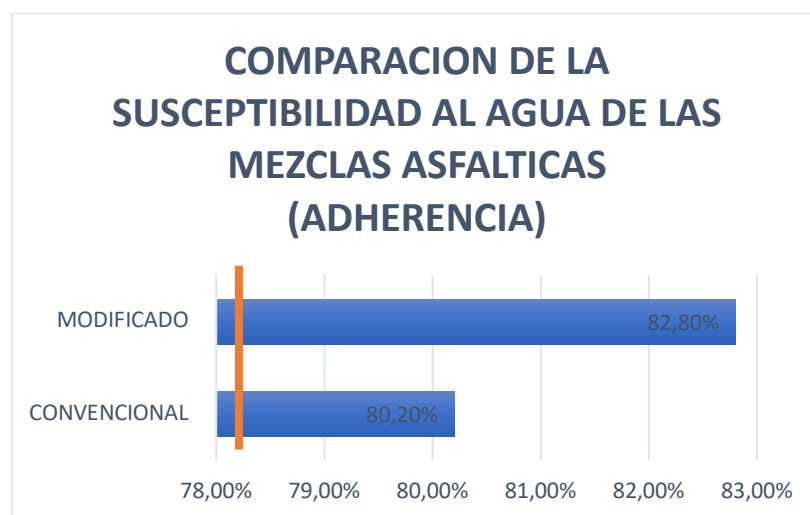


Gráfico 14 Ensayo de Adherencia

Nota: fuente propia

El ensayo de adherencia es un indicador para evaluar la resistencia que tiene una mezcla frente al daño que puede producir el agua en esta, según la norma INV E 450 la adherencia mínima que debe presentar una mezcla es del 80% cumpliendo así, ambas mezclas con el mínimo establecido por la norma, siendo el diseño de mezcla modificado con RAP el que tiene mayor adherencia, es decir, menor porcentaje de vacíos, lo cual, brinda un resultado positivo ante lo que se quiere lograr y conseguir a raíz de este ensayo, que es permitir lo menos posible la penetración del agua para así evitar fallas futuras ocasionadas por esta.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
8.3 Rueda de Hamburgo

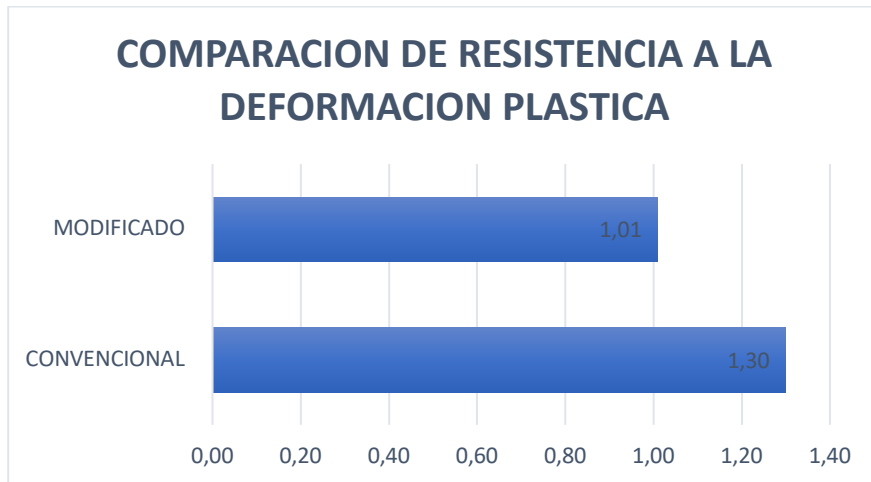


Gráfico 15 Rueda de Hamburgo

Nota: fuente propia

La rueda de Hamburgo es un ensayo que permite simular a la muestra las cargas repetitivas a las que se expone debido al tránsito y las causantes del ahuellamiento en el pavimento. En este ensayo y según la gráfica anterior, se puede observar que el diseño de mezcla convencional obtuvo mayor deformación frente a las cargas que produce el ensayo.

8.4 Módulos resilientes

El ensayo de módulos resilientes da un indicio de la calidad de los materiales que se usan en una mezcla y del comportamiento de estos frente a diferentes temperaturas de ensayo. Al ser aplicada la carga de compresión con ondas verticalmente sobre un plano diametral mide las deformaciones aplicando el ensayo de tensión indirecta con carga repetida

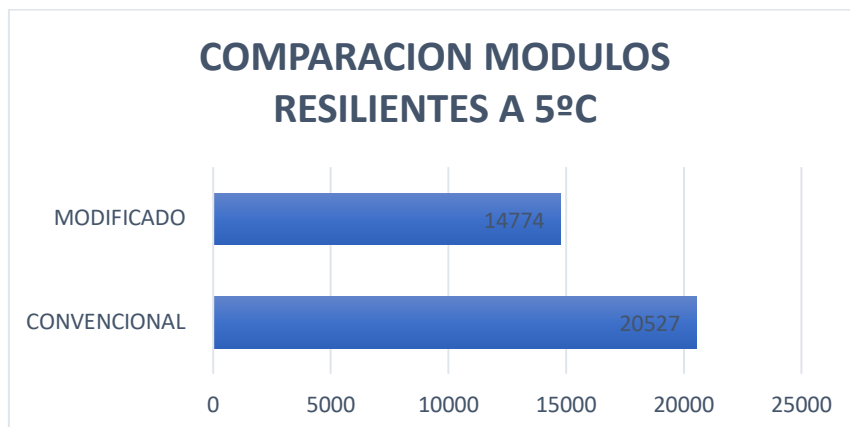


Gráfico 16 Módulos a 5°C

Nota: fuente propia

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

A 5°C, los módulos de las mezclas suelen ser muy altos, debido a que la temperatura influye en la contracción de las partículas lo cual exige un mayor esfuerzo por parte de la máquina para hacer que los especímenes se deformen.

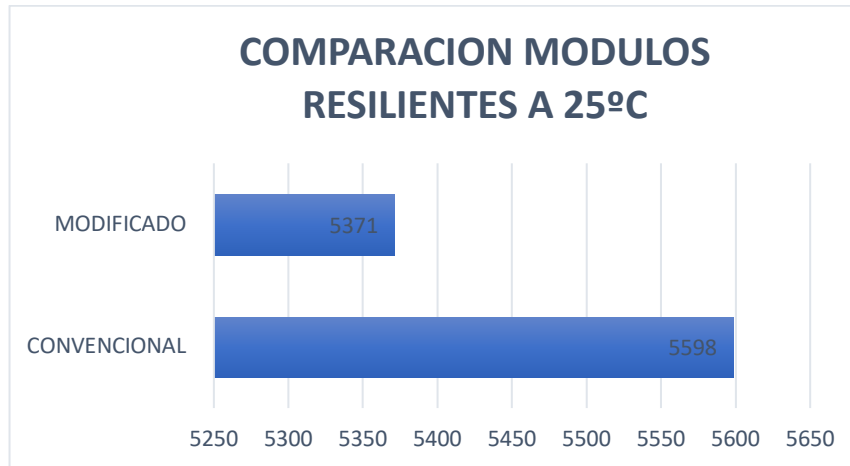


Gráfico 17 Módulos a 25°C

Nota: fuente propia

A 25°C, la temperatura ambiente a la cual están expuestas la mayoría de las carpetas asfálticas, se encuentran módulo de características normales y no hay mucha diferencia entre ambos resultados.

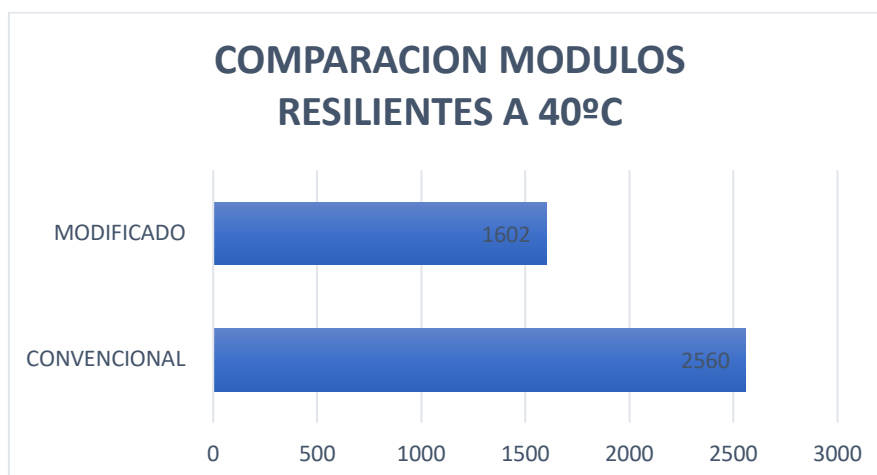


Gráfico 18 Módulos a 40°C

Nota: fuente propia

A 40°C, la alta temperatura logró que las partículas que componen la mezcla se expandieran y al ser aplicada la carga, 2 de las briquetas de ensayo fallaron en su totalidad en

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP segundos, es por esto por lo que los módulos a esta temperatura fueron tan bajos. El asfalto al ser un material visco elástico, fluye más rápido a altas temperaturas y esto ocasionó que las briquetas presentaran la falla mucho antes del tiempo esperado.

En general, de este ensayo se puede decir que las deformaciones presentadas en la mezcla convencional fueron más altas que las de la mezcla modificada con RAP, lo cual indica que el modificado trabaja mejor a bajas, medias y altas temperaturas.

9. CONCLUSIONES

- Respecto a los agregados para el diseño Marshall.

Los agregados usados para realizar el diseño Marshall convencional y diseño Marshall Modificado con adición de fresado cumplen con las normas establecidas por el Instituto nacional de vías (INVIAS) Para la selección de materiales angulares.

Se destacan ciertas características del material fresado tales como el equivalente de arena con un porcentaje de diferencia de 24,55% frente al material nuevo, lo cual nos indica que el material fresado tiene baja cantidad de arcilla frente al material nuevo. Cabe destacar que el material fresado expulso gran parte de esta arcilla no encontrada por medio del lavado de centrifuga que se realizado previamente; de igual forma el agregado del fresado tuvo un menor porcentaje de desgaste en la máquina de los ángeles el cual permitió conocer el desgaste que este sufrirá en condiciones de movimiento y roce continuo con las partículas. De la misma forma los ensayos realizados en los dos agregados (nuevo y fresado) para su respectiva caracterización, presentaron pocas diferencias.

- Al realizar los 36 especímenes para estabilidad y flujo (18 especímenes para diseño Marshall convencional y 18 especímenes para diseño Marshall modificado con adición de fresado), 4 Especímenes para la resistencia a la deformación plástica, 18 especímenes para modulo resiliente, existieron múltiples factores que pudieron influir en los resultados de los diferentes ensayos a realizar, la temperatura, los equipos

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP empleados, la calidad de los materiales, las condiciones del laboratorio. Por esta razón se optó por tomar no solo un espécimen de ensayo sino más de dos para así promediar los resultados y tener un resultado razonable y teniendo una confiabilidad en los datos porque se siguieron todas las normas respectivamente para cada ensayo.

- La inclusión del fresado en reemplazo del agregado fino convencional en un 10% en el diseño Marshall, es aquel que presento mejor comportamiento en los resultados de Estabilidad y flujo Marshall, Porcentaje de vacíos, adherencia y resistencia a la de formación plástica frente al diseño Marshall convencional y destacando que cumplió con los parámetros mínimos dados por la INV E-450-13.
- El uso del material fresado como sustitución de un 10% en la tolva del agregado fino del convencional para Diseños Marshall MSC-25 contribuye con la reducción de la acumulación de este material en acopios, además ayuda a disminuir el impacto ambiental como deterioro de los paisajes, aprovechamiento de espacios para otros fines y disminución del agregado pétreo
- El diseño Marshall MSC-25 modificado con adición de fresado con tolva aportante de un 10% puede ser empleado para vías secundarias y terciaras con nivel de transito medio gracias a los resultados mostrados en el proyecto.
- El diseño Marshall MSC-25 convencional cumple con todos los parámetros mínimos exigidos por la norma INV E-450-13 lo cual es un resultado bueno para un diseño de vías NT1, pero a su vez el Diseño Marshall MSC-25 modificado con adición de fresado proporciona unos mejores resultados frente al convencional. Los cual se

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP
puede concluir que la adición de fresado fue un mejoramiento para el Diseño Marshall
MSC-25 o la mezcla.

- El diseño Marshall MSC-25 modificado presento buen resultado frente a los ensayos mecánicos, cumpliendo a cabalidad los límites mínimos y máximos presentados en la norma INV E-450-13 pero a la hora de exponer este diseño a los ensayos dinámicos los resultados fueron bajos frente al diseño Marshall convencional y de esto se puede concluir que este diseño no puede ser expuesto en condiciones de temperaturas muy bajas o muy altas, ya que sus módulos dinámicos así nos lo indicaron. En caso contrario El diseño Marshall MSC-25 Convencional si puede ser expuesto a temperaturas altas o bajas, ya que su resultado fue más favorable en este ensayo.

10. REFERENCIAS

- AASHTO , T.-3. (2013). *Resistencia a la deformacion plastica; Rueda de hamburgo*.
- Angel , J. S. (2010). Estudio de las ventajas del reciclaje in situ en caliente de pavimentos flexibles. Bogota: Universidad de la Salle .
- Anonimo. (2007). *Materiales asfalticos, Aditivos y Mezclas*. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3334/34065-25.pdf>
- Anonimo. (2009). Obtenido de PAVIMENTOS : <http://www.registrocdt.cl/registrocdt/www/admin/uploads/docTec/Pavimentos.pdf>
- Anonimo. (2014). *EcuRed*. Obtenido de https://www.ecured.cu/Pavimento_flexible
- Buitrago Zarabanda, J. F. (2016). *CARACTERIZACIÓN DEL RAP E IDENTIFICACIÓN DE SU INFLUENCIA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE*. Bogota D.C : Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas . Obtenido de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/3207/1/BuitragoZarabandaJuanFelipe2016.pdf>
- Burgos, P. A. (2015). Diagnostico sobre el empleo del material asfaltico reciclado (RAP) en Bogota . Bogota D.C: Universidad de los Andes .
- Centeno Ortiz , M. (Agosto de 2007). *Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación de firmes a partir del análisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX*. Obtenido de <file:///C:/Users/HP%20Notebook/Downloads/2052Texto%20del%20art%C3%ADculo-3298-1-10-20120925.pdf>
- Corredor , G. M., & Corros , M. B. (Agosto de 2010). *Mestria en vias terrestres*. Obtenido de <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/fallas-en-pavimentos1.pdf>
- Giordani , C., & Leone, D. (2012). *Universidad Tecnologia Nacional* . Obtenido de Pavimentos : https://www.fro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_ano/civil1/files/IC%20I-Pavimentos.pdf
- Hernandez , P. H. (2014). Evaluacion del comportamiento mecanico de mezclas asfalticas utilizando pavimento reciclado, ligantes hidraulicos y emulsiones asfalticas . Bogota D.C: Universidad Nacional de Colombia .
- INVE-125. (2013). *Determinación del limite liquido de los suelos*. Instituto Nacional de Vias.
- INVE-126. (2013). *Limite plastico e indice de plasticidad de los suelos*. Instituto Nacional de Vias.
- INVE-133. (2013). *Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. Instituto Nacional de Vias.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

- INVE-201. (2013). *Muestreo de agregados para la construcción de carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-202. (2013). *Reducción de muestras de agregado por cuarteo*. Instituto Nacional de vías.
- INVE-213. (2013). *Análisis granulométrico de agregado fino y grueso*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-218. (2013). *Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de los ángeles*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-220. (2013). *Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o magensio*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-222. (2013). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-223. (2013). *Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-224. (2013). *Determinación del valor de 10% de finos*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-227. (2013). *Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-230. (2013). *Índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-238. (2013). *Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión utilizando el aparato MICRO-DEVAL*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-239. (2013). *Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-706. (2013). *Penetración de los materiales bituminosos*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-709. (2013). *Punto de inflamación y de combustión mediante la copa abierta de Cleveland*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-712. (2013). *Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (Aparato de anillo y bola)*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-725. (2013). *Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-732. (2013). *Extracción cuantitativa de asfalto en mezclas para pavimentos*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-733. (2013). *Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos*. Instituto Nacional de Vías.
- INVE-748. (2013). *Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall*. Instituto Nacional de Vías.

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

- INVE-749. (2013). *Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas*. Instituto Nacional de Vías .
- INVE-799. (2013). *Análisis Volumétrico de mezclas asfálticas compactadas en caliente*. Instituto Nacional de vías .
- INVE-802. (2013). *Determinación de la gravedad específica Bulk y de la densidad de mezclas asfálticas compactadas mediante el método de sellado automático por vacío* . Instituto Nacional de Vías .
- Mendez Revollo, A. M. (2015). *EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL USO DE PAVIMENTO ASFALTICO RECICLADO (RAP) EN VIAS COLOMBIANAS*. Obtenido de Universidad Militar de Nueva Granada :
[https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13208/EVALUACION%20Y%20ECONOMICA%20DEL%20USO%20DE%20PAVIMENTO%20ASFALTICO%20RECICLADO%20\(RAP\)%20EN%20VIAS%20COLOMBIANAS.pdf;jsessionid=1ADE6FD1BC2E07FBECAAA9249F5C4E9D?sequenc](https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13208/EVALUACION%20Y%20ECONOMICA%20DEL%20USO%20DE%20PAVIMENTO%20ASFALTICO%20RECICLADO%20(RAP)%20EN%20VIAS%20COLOMBIANAS.pdf;jsessionid=1ADE6FD1BC2E07FBECAAA9249F5C4E9D?sequenc)
- Valdez, V., Gonzalo, A., & Martinez R. (2008). *Estudio de Variabilidad En Mezclas Asfálticas en Caliente Fabricadas con Altas Tasas de Material Asfáltico Reciclable* . Obtenido de Revista de la construcción:
<https://www.redalyc.org/pdf/1276/127612580006.pdf>
- Zona, C. (09 de Enero de 2018). *Zona cero*. Obtenido de
<http://zonacero.com/generales/segun-el-runt-colombia-inicio-el-2018-con-136-millones-de-automotores-98405>
- Zuñiga , R. (Marzo de 2016). *Vialidad*. Obtenido de
<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/Mezcla%20con%20RAP%20Marzo%202016.pdf>

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

11. ANEXOS

11.1 ANEXO 1

Distribución del material para briquetas para el diseño Marshall Convencionales con un peso de 1200 gramos, para cada porcentaje de asfalto utilizado

	1200		
3,5%	42		
Peso agregado	1158		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	254,76	92,64	810,6
Para 3 briquetas	764,28	277,92	2431,8

Peso total	1200		
4,0%	48		
Peso agregado	1152		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	253,44	92,16	806,4
Para 3 briquetas	760,32	276,48	2419,2

Peso total	1200		
4,5%	54		
Peso agregado	1146		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	252,12	91,68	802,2
Para 3 briquetas	756,36	275,04	2406,6

Peso total	1200		
5,0%	60		
Peso agregado	1140		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	250,8	91,2	798
Para 3 briquetas	752,4	273,6	2394

Peso total	1200		
5,5%	66		
Peso agregado	1134		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	249,48	90,72	793,8

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Para 3 briquetas	748,44	272,16	2381,4
---------------------	--------	--------	--------

Peso total	1200		
6,0%	72		
Peso agregado	1128		
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)
Para 1 briqueta	248,16	90,24	789,6
Para 3 briquetas	744,48	270,72	2368,8

11.2 ANEXO 2

Distribución del material para briquetas para el diseño Marshall Convencionales con un peso de 1200 gramos, para cada porcentaje de asfalto utilizado

Peso total	1200			
3,5%	42			
Peso agregado	1158			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	254,76	92,64	694,8	115,8
Para 3 briquetas	764,28	277,92	2084,4	347,4

Peso total	1200			
4,0%	48			
Peso agregado	1152			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	253,44	92,16	691,2	115,2
Para 3 briquetas	760,32	276,48	2073,6	345,6

Peso total	1200			
4,5%	54			
Peso agregado	1146			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	252,12	91,68	687,6	114,6

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

Para 3 briquetas	756,36	275,04	2062,8	343,8
---------------------	--------	--------	--------	-------

Peso total	1200			
5,0%	60			
Peso agregado	1140			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	250,8	91,2	684	114
Para 3 briquetas	752,4	273,6	2052	342

Peso total	1200			
5,5%	66			
Peso agregado	1134			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	249,48	90,72	680,4	113,4
Para 3 briquetas	748,44	272,16	2041,2	340,2

Peso total	1200			
6,0%	72			
Peso agregado	1128			
	Tolva 1 (3/4)	Tolva 2 (1/2)	Tolva 3 (Fino)	Tolva 4 (RAP)
Para 1 briqueta	248,16	90,24	676,8	112,8
Para 3 briquetas	744,48	270,72	2030,4	338,4

11.3 ANEXO 3

A continuación, se muestran los respectivos datos de Gmm para cada punto de asfalto utilizando en el diseño Marshall Convencional

DENSIDAD FINO	2,545	
DENSIDAD GRUESO	2,59	
Gsb		2,558
MASA EN EL AIRE MUESTRA SECA	1020,387	3,5%
MASA DEL MATRAZ LLENO DE AGUA	1312,7	
Matraz+ Muestra	1342,72	
Masa matraz+agua+mezcla	1926,4	
GMM	2,5117	
Gse	2,657721919	

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	982,597	4%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1312,27	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1906,78	
GMM	2,5319	
Gse	2,704909245	

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	842,677	4,5%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1312,27	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1813,64	
GMM	2,469	
Gse	2,653028667	

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	898,3774	5,0%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1312,7	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1846,27	
GMM	2,4655	
Gse	2,672032004	

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	832,9	5,5%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1261,56	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1757,05	
GMM	2,4685	
Gse	2,69972634	

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	899,837	6,0%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1312,27	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1837,87	
GMM	2,4045	
Gse	2,64184617	

MASA EN EL AIRE DE LA MUESTRA SECA	681,19	6,5%
MASA DEL MATRAZ LLENO CON AGUA	1261,56	
MASA DEL MATRAZ, AGUA MÁS MEZCLA	1653,44	
GMM	2,3545	
Gse	2,59984176	

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

11.4 ANEXO 4

A continuación, se muestran los respectivos datos de Gmm para cada punto de asfalto utilizando en el diseño Marshall Modificado.

Densidad fino Conv	60,0%	CON + RAP	1,5276	1,6519327
Densidad fino RAP	5,30%		0,1243327	
Densidad grueso Conv	30%	CON + RAP	0,777	0,8959335
Densidad grueso RAP	4,7%		0,1189335	
gravedad del cemento asf		0,99875		
Gsb Fresado		2,546733		
masa en el aire de la muestra seca			750,45 g	3,5%
masa del matraz lleno con agua			1314,43 g	
masa del matraz , agua mas mezcla			1762,53 g	
gmm			2,48205722	
		Gse	2,62336764	
masa en el aire de la muestra seca			860,11 g	4,0%
masa del matraz lleno con agua			1314,43 g	
masa del matraz , agua mas mezcla			1824,33 g	
gmm			2,45598355	
		Gse	2,61495742	
masa en el aire de la muestra seca			764,89 g	4,5%
masa del matraz lleno con agua			1314,43 g	
masa del matraz , agua mas mezcla			1764,96 g	
gmm			2,4331658	
		Gse	2,60978248	
masa en el aire de la muestra seca			940,67 g	5%
masa del matraz lleno con agua			1314,43 g	

DISEÑO DE MEZCLA CONVENCIONAL Y MODIFICADA CON RAP

masa del matraz , agua mas mezcla			1868,45	g	
gmm			2,43287210		
			7		
Gse			2,63176677		
			3		
masa en el aire de la muestra seca			825,68	g	5.5%
masa del matraz lleno con agua			1314,43	g	
masa del matraz , agua mas mezcla			1796,12	g	
gmm			2,40030233		
			4		
Gse			2,61377999		
			6		
masa en el aire de la muestra seca			791,12	g	6%
masa del matraz lleno con agua			1314,43	g	
masa del matraz , agua mas mezcla			1771,33	g	
gmm			2,36706361		
			1		
Gse			2,59389585		
			3		