

**EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE AHUELLAMIENTO MEDIANTE
TOMOGRFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS X EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC
Y SMA SOMETIDAS AL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.**



SANDRA CATERINE MANRIQUE URREA

VALENTINA SEGURA LONDOÑO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS

POPAYÁN

2023

EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE AHUELLAMIENTO MEDIANTE TOMOGRAFÍA
COMPUTARIZADA DE RAYOS X EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC Y SMA
SOMETIDAS AL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.
TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA DE PAVIMENTOS. MODALIDAD PROFUNDIZACIÓN

SANDRA CATERINE MANRIQUE URREA
VALENTINA SEGURA LONDOÑO

Director

JAIME RAFAEL OBANDO ANTE, Ph.D.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PAVIMENTOS
POPAYÁN

2023

Nota de aceptación

Director: _____

PhD Jaime R. Obando Ante

Jurado: _____

Mg. Hugo León Arenas Lozano

Jurado: _____

Mg. Erick Daniel Calidonio Molina

Lugar y fecha de sustentación: Popayán, 28 de abril de 2023

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecemos a Dios por la oportunidad de escalar un peldaño más en nuestras vidas profesionales y en segundo lugar a nuestras familias por ser el motor y motivación; por inculcarnos todos los valores que hoy nos han llevado a lograr una meta más en nuestra vida.

De manera muy atenta, agradecemos a nuestro director el Ingeniero Jaime Rafael Obando Ante, a nuestro mentor el Ingeniero Hugo León Arenas Lozano, a nuestro colega el Ingeniero Erick Daniel Calidonio Molina, al Coordinador de la Maestría en Ingeniería de Pavimentos de la Universidad del Cauca, el Ingeniero Ferney Quiñones Sinisterra quienes con su ejemplo, acompañamiento, conocimiento y apoyo aportaron a la elaboración de este trabajo.

Agradecemos a nuestros colaboradores que con diferentes servicios aportaron al desarrollo del trabajo, el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad del Cauca, el laboratorio de Suelos Citec Ltda, la Planta de Asfaltos Humberto Quintero O y CIA SCA, la planta de agregados Cachibí S.A:S, Surfax Colombia y la Clínica Teleimágenes Express Popayán.

Y finalmente agradecemos la una a la otra por el apoyo mutuo y especialmente por tantos años de amistad.

DEDICATORIA

Dedicamos este título a Dios y a nuestras familias, por su apoyo, paciencia, tiempo y sobre todo por el amor. Por ellos y para ellos estamos aquí, queriendo crecer para compartir nuestros logros con ellos.

A Gabriela, para que cada una de mis metas alcanzadas le quede como ejemplo.

Y recuerden “*Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo*”.

Albert Einstein.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Título	3
1.2. Formulación del Problema.	3
1.3. Justificación.	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Alcance	8
1.6. Objetivos.	9
A. Objetivo general	9
B. Objetivos específicos.	9
2. REVISIÓN DE LITERATURA	10
2.1. Ahuellamiento	10
2.2. Tomografía computarizada rayos-x.	19
2.3. Mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt (SMA).	29
3. METODOLOGÍA	35
3.1. Revisión bibliográfica.	37
3.2. Fase 1: Caracterización de materiales y diseño de mezclas asfálticas MDC y SMA.	37
3.2.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC).	39

3.2.1.1. Caracterización de materiales.	39
a. Agregados minerales:	40
b. Cemento Asfaltico:	40
3.2.1.2. Chequeo de diseño.	41
3.2.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)	42
3.2.2.1. Caracterización de materiales.	43
a. Agregados minerales:	43
b. Cemento Asfaltico	45
c. Fibra Celulosa	45
3.2.2.2. Diseño de mezcla SMA	46
a. Selección De Agregados:	47
b. Determinar la gradación adecuada,	48
c. Determinación del contenido del asfalto óptimo.	55
d. Evaluar susceptibilidad a la humedad y al escurrimiento del asfalto	57
3.3. Fase 2: Fabricación de probetas de las mezclas asfálticas y diseño experimental.	62
3.3.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).	63
3.3.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)	64
3.3.3. Preparación de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:	66
3.4. Fase 3: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas previa a ser sometidas a deformación permanente.	68
3.5. Fase 4: Ensayo de probetas en el equipo rueda de Hamburgo.	71

3.6.	Fase 5: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas después de falladas en la rueda de Hamburgo.	75
3.7.	Fase 6: Resultados y análisis	77
4.	RESULTADO Y ANÁLISIS	78
4.1.	Fase 1: Caracterización de materiales y diseño de mezclas asfálticas MDC y SMA.	78
4.1.1.	Mezcla Densa en Caliente (MDC).	78
4.1.1.1.	Caracterización de materiales	78
a.	Agregados minerales:	79
b.	Cemento Asfáltico:	80
4.1.1.2.	Chequeo de diseño:	81
4.1.2.	Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)	84
4.1.2.1.	Caracterización de materiales:	84
a.	Agregados minerales:	84
b.	Aditivo:	86
4.1.2.2.	Diseño de mezcla SMA	86
a.	Selección De Agregados:	86
b.	Determinar la gradación adecuada:	87
c.	Determinación del contenido del asfalto óptimo.	93
d.	Evaluar la susceptibilidad a la humedad y al escurrimiento del asfalto	96
4.1.3.	Análisis de materiales y diseño para las mezclas asfálticas MDC 19 y SMA	
12,5.		99

4.1.3.1. Caracterización de materiales en las mezclas MDC 19 y SMA 12,5.	99
4.1.3.2. Diseño de las mezclas MDC 19 y SMA 12,5.	102
4.2. Fase 2: Fabricación de probetas de las mezclas asfálticas y diseño experimental.	107
4.2.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).	107
4.2.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)	109
4.2.3. Preparación de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:	113
4.2.4. Análisis de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:	114
4.3. Fase 3: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas antes de ser sometidas a deformación permanente.	115
4.3.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).	121
4.3.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)	129
4.3.3. Análisis comparativo entre mezclas MDC-19 y SMA-12,5 en la fase de tomografía previa a la falla por ahuellamiento.	134
4.4. Fase 4: Ensayo de probetas en el equipo rueda de Hamburgo.	136
4.4.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).	136
4.4.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5).	144
4.4.3. Análisis comparativo entre mezclas MDC-19 y SMA-12,5 en la fase de Rueda de Hamburgo.	153
4.5. Fase 5: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas después de falladas en la rueda de Hamburgo.	156
4.5.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).	158

4.5.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)	165
4.5.3. Análisis comparativo entre MDC-19 y SMA-12,5 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo. 172	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	175
5.1. Conclusiones.	175
5.2. Recomendaciones.	180
BIBLIOGRAFÍA.	182

Listado de Figuras.

Figura 1 <i>Ahuellamiento en acceso a peaje.</i>	5
Figura 2 <i>Modelado de falla de ahuellamiento.</i>	11
Figura 3 <i>Falla de ahuellamiento en un carril.</i>	12
Figura 4 <i>Equipo de Ensayo Triaxial Dinámico.</i>	13
Figura 5 <i>Equipo de Ensayo de Rueda Cargada.</i>	13
Figura 6 <i>Ahuellamiento versus presión de contacto y temperatura.</i>	15
Figura 7 <i>Imágenes de corte transversal de briquetas.</i>	16
Figura 8 <i>Deformación versus tiempos de carga.</i>	17
Figura 9 <i>Esquema de partes de la Tomografía Computarizada Rayos-x.</i>	20
Figura 10 <i>Absorción de los rayos X por los distintos tejidos</i>	21
Figura 11 <i>Modelación de imágenes obtenidas mediante TC Rayos-X.</i>	22
Figura 12 <i>Esquema de procesamiento de imágenes Rayos-X.</i>	23
Figura 13 <i>Proceso de cálculo de contactos efectivos del cemento asfáltico.</i>	26
Figura 14 <i>Modelo simulación de agregados.</i>	27
Figura 15 <i>Reconstrucción de imágenes obtenidas con Rayos-X con escala de grises.</i> ...	28
Figura 16 <i>Gráfico de Mezcla Stone Mastic Asphalt.</i>	29
Figura 17 <i>Granulometría SMA versus granulometría MDC.</i>	30
Figura 18 <i>Fibra Celulosa.</i>	31
Figura 19 <i>Espécimen para ensayo de Wheel Tracking.</i>	32
Figura 20 <i>Esquipo para ensayo de peso unitario.</i>	33
Figura 21 <i>Esquema metodología</i>	36
Figura 22 <i>Materiales de mezclas asfálticas MDC y/o SMA.</i>	37

Figura 23 <i>Equipo Marshall para evaluación de Estabilidad y Flujo en el Laboratorio</i>	
<i>CITEC</i>	42
Figura 24 <i>Ensayos de laboratorio a agregados minerales</i>	44
Figura 25 <i>Procedimiento de diseño mezcla SMA</i>	46
Figura 26 <i>Definición de vacíos en la mezcla asfáltica y el agregado</i>	48
Figura 27 <i>Especificación de las bandas granulométricas para mezclas Stone Mastic</i>	
<i>Asphalt</i>	49
Figura 28 <i>Briquetas para selección de gradación en mezcla SMA</i>	52
Figura 29 <i>Gravedad específica máxima teórica (G_{mm})</i>	56
Figura 30 <i>Proceso de determinar escurrimiento en mezclas asfálticas sin compactar</i> ...	58
Figura 31 <i>Prueba de susceptibilidad a la humedad en el laboratorio de la Universidad</i>	
<i>del Cauca</i>	60
Figura 32 <i>Fabricación de briquetas MDC-19 para Rueda de Hamburgo</i>	64
Figura 33 <i>Fabricación de briquetas SMA-12,5 para Rueda de Hamburgo</i>	65
Figura 34 <i>Molde para Rueda de Hamburgo</i>	67
Figura 35 <i>Proceso de corte de los especímenes</i>	68
Figura 36 <i>Tomógrafo Siemens Somatom Perspective</i>	69
Figura 37 <i>Proceso de tomografía Computarizada rayos X previo de la prueba de</i>	
<i>ahuellamiento</i>	70
Figura 38 <i>Montaje de muestras y ensayo de Rueda de Hamburgo</i>	73
Figura 39 <i>Grafica deformación vs pasadas</i>	75
Figura 40 <i>Toma de imágenes con Tomografía Computarizada rayos X después de</i>	
<i>ahuellamiento</i>	76

Figura 41 Franja y la curva granulométrica de la mezcla MDC 19 a trabajar en el diseño.	82
Figura 42 Bandas granulométricas de mezcla SMA 12,5 mm y gradaciones a trabajar en el diseño.	88
Figura 43 Gráficas de propiedades en función del contenido de asfalto.	94
Figura 44 Granulometrías MDC 19 vs SMA 12,5	101
Figura 45 Probetas MDC 19 y SMA 12,5.	113
Figura 46 Vista en planta y en 3D de las 6 muestras antes de someterse a falla por ahuellamiento.	116
Figura 47 Apreciaciones generales del proceso de tomografía	117
Figura 48 Unidades Hounsfield (HU) Cuerpo Humano	118
Figura 49 Imágenes de calibración escala de grises.	119
Figura 50 Unidades Hounsfield (HU) Mezcla Asfáltica	120
Figura 51 Sección por defecto Mezclas MDC 19	121
Figura 52 Muestras MDC 19 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield previo a ensayo Rueda de Hamburgo.	123
Figura 53 Mezcla MDC 19 Ilustrada y tomografiada	125
Figura 54 Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas MDC 19 previo a Rueda de Hamburgo	126
Figura 55 Modelo 3D Mezclas MDC 19 previo a ensayo Rueda de Hamburgo.	127
Figura 56 Muestras SMA 12,5 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield previo a ensayo.	129
Figura 57 Mezcla SMA 12,5 Ilustrada y tomografiada	131

Figura 58 Cortes axiales y longitudinales de la muestra Mezclas SMA- 12,5	132
Figura 59 Modelo 3D Mezclas SMA 12,5.	133
Figura 60 Imágenes MDC 19 y SMA 12,5 Secciones comparativas previa a la falla. ..	135
Figura 61 Vista en planta de Unidades experimentales MDC 19.....	136
Figura 62 Unidades experimentales MDC 19 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo.	137
Figura 63 Comportamiento MDC 19 en ensayo Rueda Hamburgo.....	138
Figura 64 Deformación en Rueda de Hamburgo MDC 19. Unidades experimentales 1, 2 y 3.....	141
Figura 65 Vista en planta de Unidades experimentales SMA 12,5.....	144
Figura 66 Unidades experimentales MDC 19 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo	145
Figura 67 Comportamiento SMA 12,5 en ensayo Rueda Hamburgo.	146
Figura 68 Deformación en Rueda de Hamburgo SMA 12,5 Unidades Experimentales 1, 2 y 3.....	149
Figura 69 Curvas de comportamiento de mezclas MDC 19 vs SMA 12,5 en Rueda de Hamburgo	153
Figura 70 Vista en planta y en 3D de las 6 muestras posterior a someterse a falla por ahuellamiento.....	157
Figura 71 Muestras MDC 19 en la ventana personalizada unidades Hounsfield posterior al ensayo.	158
Figura 72 Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas MDC 19 posterior a Rueda de Hamburgo	160

Figura 73 Modelo 3D Mezclas MDC 19 posterior a ensayo Rueda de Hamburgo.	162
Figura 74 Muestras SMA 12,5 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield posterior a ensayo.	166
Figura 75 Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas SMA 12,5 posterior a Rueda de Hamburgo	167
Figura 76 Modelo 3D Mezclas SMA 12,5 posterior a ensayo Rueda de Hamburgo.	170
Figura 77 Mezclas MDC 19 y SMA 12,5 posterior al ensayo de Rueda de Hamburgo	173

Listado de Tablas

Tabla 1 Especificaciones para la caracterización de los agregados de la mezcla MDC.40	
Tabla 2. Especificaciones para la caracterización del asfalto Original	40
Tabla 3 Especificaciones para la caracterización del asfalto Residual	41
Tabla 4 Normas de ensayo para la caracterización de los agregados gruesos de la mezcla SMA.....	43
Tabla 5 Normas de ensayo para la caracterización de los agregados finos de la mezcla SMA.....	44
Tabla 6 Tamaño máximo nominal.....	46
Tabla 7 Definición de la fracción del agregado grueso.	50
Tabla 8 Normas de ensayo para definir el contenido de fibra celulosa	57
Tabla 9 Normas de ensayo para evaluar comportamiento de la mezcla.	59
Tabla 10. Parámetros de diseño SMA.....	62

Tabla 11 <i>Especificaciones técnicas del Tomógrafo SIEMENS.</i>	69
Tabla 12 <i>Ensayos de caracterización de los agregados para mezcla MDC 19.</i>	79
Tabla 13. <i>Ensayos de caracterización del ligante asfáltico.</i>	80
Tabla 14. <i>Gradación de materiales para diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall</i>	81
Tabla 15. <i>Fórmula de trabajo</i>	83
Tabla 16. <i>Resultados prueba Marshall en mezcla Asfáltica MDC – 19.</i>	83
Tabla 17. <i>Ensayos en fracción gruesa para agregados de mezcla SMA -12,5.</i>	84
Tabla 18. <i>Ensayos en fracción fina para agregados de mezcla SMA -12,5.</i>	85
Tabla 19. <i>Aditivo adicionado a mezcla SMA</i>	86
Tabla 20. <i>Bandas granulométricas de mezcla SMA 12,5 mm y gradaciones a trabajar en el diseño.</i>	87
Tabla 21. <i>Determinación de vacíos (VCA).</i>	89
Tabla 22. <i>Vacíos del agregado mineral (VMA) y % de Vacíos</i>	90
Tabla 23. <i>Vacíos en el agregado grueso de la mezcla</i>	91
Tabla 24. <i>Resumen de valores de (VCADRC), (VCAMIX) y VMA</i>	92
Tabla 25. <i>Valores obtenidos para la selección de contenido de asfalto SMA 12,5.</i>	93
Tabla 26. <i>Evaluación del escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA 12,5.</i>	96
Tabla 27. <i>Resultados ensayo de Tracción Indirecta INV E – 725 en mezclas SMA 12,5 mm.</i>	97
Tabla 28. <i>Resultados de la relación de resistencia a la tensión en mezcla asfáltica SMA 12,5 (RRT).</i>	98
Tabla 29. <i>Resultados de compactación Superpave de la Mezcla MDC 19.</i>	107

Tabla 30. <i>Determinación de % de vacíos con aire de la muestra MDC 19 de 2500 g..</i>	108
Tabla 31. <i>Briquetas MDC 19 para ensayar en Equipo Rueda de Hamburgo.</i>	108
Tabla 32. <i>Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 1.</i>	109
Tabla 33. <i>Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración</i>	
<i>1.....</i>	110
Tabla 34. <i>Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 2.</i>	110
Tabla 35. <i>Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración</i>	
<i>2.....</i>	111
Tabla 36. <i>Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 3.</i>	111
Tabla 37. <i>Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración</i>	
<i>3.....</i>	112
Tabla 38. <i>Briquetas SMA 12,5 para ensayar en Equipo Rueda de Hamburgo.</i>	112
Tabla 39. <i>Conformación de unidades experimentales MDC 19 y SMA 12,5.....</i>	114
Tabla 40. <i>Resultados de ahuellamiento en las mezclas MDC 19 según Norma.</i>	139
Tabla 41 <i>Resultados de ahuellamiento en las mezclas MDC 19, máxima deformación</i>	
<i>alcanzada.</i>	140
Tabla 42 <i>Fases del Ensayo Rueda de Hamburgo en las mezclas MDC 19.</i>	142
Tabla 43. <i>Resultados de ahuellamiento de las mezclas asfálticas SMA 12,5.</i>	148
Tabla 44 <i>Resultados de ahuellamiento en las mezclas SMA 12,5, máxima deformación</i>	
<i>alcanzada.</i>	148
Tabla 45 <i>Fases del Ensayo Rueda de Hamburgo en las mezclas SMA 12,5.</i>	150
Tabla 46. <i>Mediciones de deformación permanente mesclas MDC 19.....</i>	164
Tabla 47. <i>Mediciones de deformación permanente mesclas SMA 12,5.</i>	171

Resumen

En Colombia, según el reporte de Transporte en Cifras del Ministerio de Transporte (2021) se tiene que alrededor del 85% de la carga nacional se moviliza por vías terrestres con un continuo incremento año a año. A su vez, según cifras evaluadas del documento en mención, más del 50% de las vías pavimentadas en el país cuentan con estructura de pavimento flexible, haciendo necesario que estas respondan a las exigencias de carga, así como a las condiciones climáticas y topográficas del mismo. En la actualidad, las estructuras de pavimento flexible que se encuentran en servicio presentan numerosas patologías, como lo es el fenómeno de ahuellamiento, una de las fallas más comunes en la mezcla asfáltica que afecta la funcionalidad y serviciabilidad de las carreteras en Colombia.

En la búsqueda de contribuciones que ayuden a mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas en el país, el presente estudio emplea la tomografía computarizada con rayos X, para evaluar los cambios que se presentan en la estructura interna de muestras de mezcla asfáltica densa en caliente (MDC) y muestras de mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA), fabricadas en laboratorio, sometidas a prueba de ahuellamiento en Rueda de Hamburgo y a la vez dar a conocer las mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) como una alternativa a explorar e implementar en la construcción de vías en Colombia.

Palabras claves: ahuellamiento, deformación plástica, fibra celulosa, imágenes digitales, mezcla densa en caliente, rueda de Hamburgo, stone mastic asphalt, tomografía computarizada con rayos X.

Abstract

In Colombia, according to the “Transporte en cifras” report of the Transport's Ministry (2021), around 85% of the national freight is mobilized by land with a continuous increase year for year. In turn, according to data evaluated in the document, more than 50% of the paved roads in the country have a flexible pavement structure, making it necessary for them to respond of the country load requirements, as well as the climatic and topographic conditions. Currently, the flexible pavement structures in service, presenting numerous pathologies, such as the rutting phenomenon, some common failures in the asphalt mix that affects the functionality and serviceability of highways in Colombia.

In search for contributions that help to improve the performance of asphalt mixes in the country, the present study use the X-ray computed tomography to evaluate the changes that occur in the internal structure of Hot Mix Asphalt samples (HMA and SMA), produced in the laboratory, subjected at rutting in Hamburgo wheel tracking test and also, to show the Stone Mastic Asphalt (SMA) mixtures as an alternative to explore and implement in the construction of roads in Colombia.

Keywords: cellulose fiber, digital images, Hamburg wheel, hot dense mix, plastic deformation, rutting, stone mastic asphalt, X-Ray computed tomography.

1. Introducción

1.1. Título

EVALUACIÓN DEL FENÓMENO DE AHUELLAMIENTO MEDIANTE TOMOGRAFÍA COMPUTARIZADA DE RAYOS X EN MEZCLAS ASFÁLTICAS MDC Y SMA SOMETIDAS AL ENSAYO DE RUEDA DE HAMBURGO.

1.2. Formulación del Problema.

Según el reporte de Transporte en Cifras del Ministerio (Ministerio de Transporte de Colombia, 2021), en Colombia se cuenta con 205,745 km de vías existentes, de los cuales 18,323 km corresponden a vías primarias, 45,137 km a la red secundaria y 142,284 km a red terciaria. De la red vial primaria se tiene que el 59% se encuentran a cargo del INVIAS y el 41% a cargo de la ANI, bajo contratos de concesión. Cabe mencionar que en la actualidad únicamente la red vial primaria cuenta con información detallada del estado actual de las vías; por un lado, INVIAS presenta un informe semestral sobre el estado de la red vial a su cargo, clasificándola en pavimentada y no pavimentada junto con su condición (muy bueno, bueno, regular, malo y muy malo) y por otro la ANI reporta la condición de las vías concesionadas ya sea en etapa de operación, pre-construcción o construcción.

En cuanto a la red vial secundaria y terciaria, en un panorama general se puede evidenciar que son pocos los proyectos encaminados a inventariar o diagnosticar el estado de sus estructuras de pavimento, conociéndose que hasta el 2021 se han inventariado 5746,5 km de la red

secundaria y 39919 km de la red terciaria. Entre los departamentos del país interesados por conocer el estado de sus vías con el fin de generar nuevos planes de inversión (USAID, 2016), se encuentra Antioquia en el 2015 (Gobernación de Antioquia, 2015), Valle del Cauca en el 2018 (Gobernación Valle del Cauca, 2018), el departamento del Cauca, (Gobernación del Cauca, 2018), entre otros.

A su vez, según cifras evaluadas del documento en mención, se tiene que más del 50% de las vías pavimentadas en el país cuentan con estructura de pavimento flexible y que para el año 2021 se movilizaron 254864 toneladas de carga por medio terrestre carretero, siendo este medio de transporte el responsable de movilizar el 85 % de la carga nacional que circula en Colombia. Lo que evidencia que este tipo de estructuras son en gran medida responsables del desarrollo del país y principal mecanismo de transporte en Colombia, por lo tanto, éstas deben ser adecuadas para soportar las cargas del parque automotor y las condiciones climáticas a las que serán sometidos los proyectos de infraestructura vial.

Por otro lado, las mezclas asfálticas corresponden a un material ampliamente empleado en la construcción de carreteras y su composición de materiales es heterogénea conformada por agregados con forma irregular y distribución aleatoria, ligante asfáltico y vacíos con aire (Liu et al., 2017a). Entre las principales fallas y patologías de la carpeta asfáltica se encuentran la fisuración, deformaciones plásticas, desprendimientos, segregaciones y exudaciones. Sumado a las condiciones de carga que soportan los pavimentos en el país, estos están sometidos a otros factores como el clima (altas temperaturas y humedad), que pueden ser reflejados en diferentes patologías que indican deterioro e implican el costo de futuras intervenciones de reparación.

Una de las fallas más comunes en las vías colombianas corresponde a la deformación plástica o ahuellamiento, la cual puede presentarse en la mezcla asfáltica como es el caso de la **Figura 1** o en las capas inferiores de la estructura del pavimento (Caro et al., 2003).

Figura 1

Ahuellamiento en acceso a peaje.



Nota: La figura corresponde a la falla de ahuellamiento presentada en la caseta de peaje de Oiba, Santander - Colombia. Fuente: <https://acortar.link/WK1pb3>

Las condiciones claves para que se manifieste la nombrada falla son, por un lado, que se tengan altas cargas acompañadas de bajas velocidades (Wu et al., 2018), condiciones apreciables en zonas del país con terreno montañoso y escarpado, donde transitan vehículos de carga con largos ascensos a velocidades muy bajas y por otro lado el ahuellamiento es susceptible a la temperatura dado que el cemento asfáltico a altas temperaturas presenta un comportamiento visco elástico, que lo hace deformable a la acción de las cargas (Onifade et al., 2013).

Las alternativas que maneja Colombia para prevenir y solucionar las patologías de los pavimentos, se pueden encontrar las Especificaciones Generales de construcción de Carreteras de Colombia 2022, Capítulo 4, en el cual se describe y aprueba la elaboración, transporte y colocación de Mezclas en Frío, Mezclas en Caliente, Mezclas de Alto Módulo, Mezclas Drenantes y Mezclas Modificadas con Grano Caucho, entre otras. Si bien, las mezclas de alto módulo o modificadas con grano caucho pueden ser una opción de diseño resistente a las deformaciones permanentes, a nivel mundial se cuenta con otras alternativas de mezcla asfáltica que han sido implementadas de manera eficiente en otros países, entre ellas las Stone Mastic Asphalt (SMA).

En países como Alemania desde el año 1960 se emplean SMA, definidas como mezclas asfálticas compuestas de agregado con alto contenido de fracción gruesa, filler y asfalto para ser sometidas a altas temperaturas de servicio y grandes volúmenes de tráfico presentando un excelente desempeño (Nikolaides, 2000), lo que impulsó a que países como Estados Unidos adoptaran este tipo de mezcla en 23 estados; en Asia, países como Filipinas, Taiwán, Hong Kong, Corea del Sur, China y Japón establecieron sus propias especificaciones de construcción para emplear las SMA en sus carreteras como una tecnología eficiente en la solución de fallas por ahuellamiento de las estructuras de pavimento; desde luego, en Latinoamérica se tiene países incursionando en las mezclas SMA, tales como Brasil, Chile, Argentina y Colombia (Wellmann, 2005).

Conociendo las condiciones y alternativas de Colombia para mejorar el desempeño de las mezclas asfálticas, el presente estudio intenta emplear la tomografía de imágenes médicas

computarizada con rayos X con el fin de evaluar los cambios que potencialmente se puedan obtener en muestras fabricadas en laboratorio con mezclas Stone Mastic Asphalt y Mezclas Densas en Caliente, antes y después de ser ensayadas en un simulador de tráfico (tipo rueda de Hamburgo). Teniendo como objetivo principal verificar que las mezclas SMA sean una alternativa de construcción a estudiar y a emplear en las vías de Colombia, dado que en experiencias de otros países han cumplido con las exigencias para soportar las condiciones de carga y temperatura que generan el fenómeno de ahuellamiento.

1.3. Justificación.

En Colombia es importante estudiar el fenómeno de ahuellamiento de los pavimentos flexibles dado que las condiciones ambientales y de tráfico actuales del país pueden ser la causa de este tipo de falla en las mezclas asfálticas en condiciones de servicio. Las exigencias de transporte de carga y de movilización en la nación son atendidas principalmente por estructuras de pavimentos flexibles y por ello se debe garantizar permanentemente la seguridad y serviciabilidad de los mismos.

En busca de lo anterior, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías de evaluación del ahuellamiento que permiten entender detalladamente el comportamiento de las mezclas asfálticas bajo este fenómeno, dentro de los cuales se encuentran: pruebas dinámicas, ensayos a escala real (Reyes Ortiz et al., 2006), correlaciones entre las medidas de resistencia al ahuellamiento a pequeña y a gran escala (Chaturabong & Bahia, 2017), evaluación de la influencia de los materiales en el potencial de ahuellamiento (Reyes & Camacho, 2008),

evaluación de la prueba de ahuellamiento *Rotary Loaded Wheel Tester* (RLWT) de mezclas asfálticas basada en tomografía industrial computarizada (Wu et al., 2018), entre otros. Lo anterior ha generado la creación de nuevas metodologías de diseño, formas de modelación estructural y por tanto la necesidad de actualización de conocimiento en el campo de las mezclas asfálticas.

Dadas las condiciones técnicas en las estructuras de pavimento de Colombia y puesto que es un país en vía de desarrollo, se debe priorizar y profundizar en las temáticas que aporten significativamente en su desarrollo tecnológico. Por esta razón el presente estudio enfocado a los pavimentos flexibles, implementará el uso de métodos de evaluación no destructiva de materiales (TC Rayos-X), en el análisis de las propiedades de la mezcla asfáltica SMA (Stone Mastic Asphalt), como una alternativa viable para solucionar los problemas del fenómeno de ahuellamiento en las vías colombianas.

1.4. Hipótesis

El empleo de la tomografía computarizada con rayos X permitirá observar las diferencias que se presentan entre la deformación plástica de una mezcla SMA y una MDC evaluadas en el equipo Rueda de Hamburgo.

1.5. Alcance

El presente estudio tiene por alcance dar a conocer los cambios generados en muestras de mezcla SMA y muestras de mezcla MDC obtenidas de laboratorio mediante el empleo de compactador giratorio, las cuales fueron sometidas a falla por ahuellamiento en el equipo rueda de Hamburgo y analizadas mediante el empleo de la Tomografía Computarizada de Rayos X, determinando la variación y comportamiento que se genera internamente en la composición volumétrica de las mezclas asfálticas al ser visualizada previo y posterior a la falla.

1.6. Objetivos.

A. Objetivo general

Evaluar el efecto generado en la estructura interna en mezclas asfálticas MDC y SMA mediante Tomografía médica Computarizada de Rayos – X antes y después de ser sometidas al ensayo de rueda de Hamburgo.

B. Objetivos específicos.

- Someter a falla por ahuellamiento las mezclas MDC y SMA mediante el ensayo rueda de Hamburgo.
- Comparar el comportamiento de las mezclas MDC y SMA sometidas a deformación permanente mediante el análisis de imágenes tomadas con Tomografía Computarizada Rayos-X.
- Analizar la influencia de la granulometría y el contenido de asfalto en la resistencia a la deformación plástica de las mezclas evaluadas.

2. Revisión de Literatura

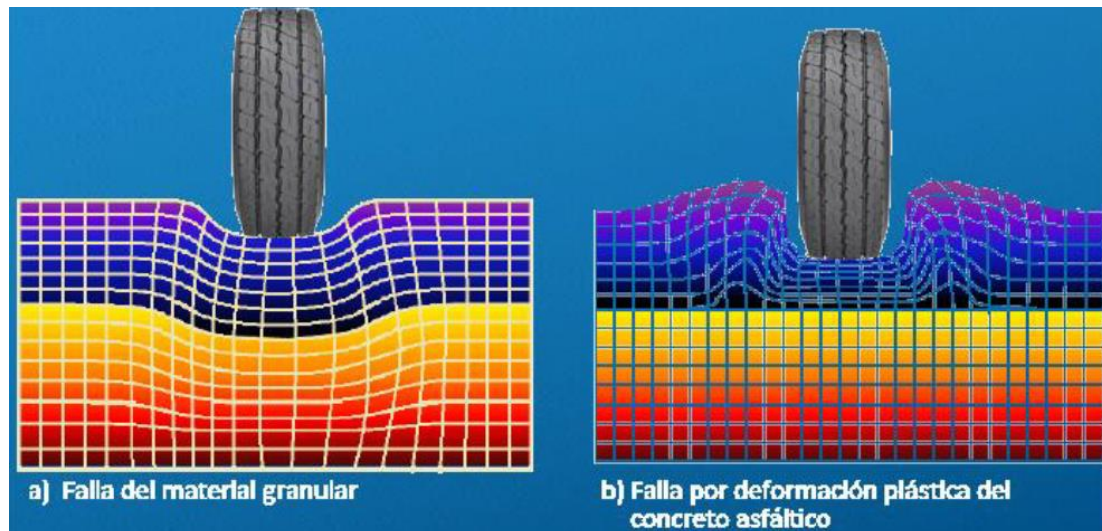
2.1. Ahuellamiento

El ahuellamiento de la mezcla asfáltica en pavimentos flexibles es un tipo común de mecanismo de falla, particularmente en sitios con cargas pesadas de tráfico y altas temperaturas de servicio. Corresponde a la deformación vertical permanente de las capas asfálticas, que a su vez representa la acumulación de la deformación irre recuperable que ocurre cada vez que una carga es aplicada, debido al comportamiento intrínseco del ligante bituminoso y/o a la baja resistencia al corte de la mezcla asfáltica (Chaturabong & Bahia, 2017). Esta compromete la seguridad y la comodidad de la conducción y, por lo tanto, debe evaluarse con precisión.

Cuando la mezcla asfáltica posee suficiente resistencia al corte, el ahuellamiento puede ocurrir después de un largo periodo de vida en servicio y es probable que el daño se encuentre en las capas inferiores del pavimento (Reyes Ortiz et al., 2006). Por otro lado, cuando la mezcla asfáltica posee baja resistencia al corte, el ahuellamiento puede ocurrir en un corto periodo de tiempo después de la construcción (Nikolaides, 2000), siendo probable la falla por condiciones internas de las propiedades de los materiales que componen la mezcla o condiciones externas de efecto clima y carga en la mezcla asfáltica. En la **Figura 2** se puede observar la modelación numérica de la falla por ahuellamiento generado en la carpeta asfáltica y en las capas que componen la estructura de pavimento.

Figura 2

Modelado de falla de ahuellamiento.



Nota: La figura representa la modelación de fallas por ahuellamiento en capas granulares o estructura de pavimento en el lado izquierdo y en mezcla asfáltica en el lado derecho (CAF, 2018)

De acuerdo con Chaturabong & Bahia (2017), el ahuellamiento en mezcla asfáltica tiene dos mecanismos principales de falla: el primero es la falla de corte, que es un desplazamiento lateral de la mezcla asfáltica y se presenta normalmente durante la vida en servicio de la misma y el segundo corresponde a la densificación de la mezcla, que es un cambio volumétrico que se produce en su mayoría durante el proceso de construcción. Muchas veces la falla es producto de la combinación de ambos mecanismos. La deformación en el pavimento se evidencia como una depresión longitudinal bajo las huellas de las ruedas y algunas veces se forman crestas en los laterales de las huellas como se observa en **Figura 3**.

Figura 3

Falla de ahuellamiento en un carril.



Nota: La figura representa la fotografía de una carpeta asfáltica en condición de falla de ahuellamiento. Fuente: (Silva Friderichsen, 2015)

Según Rondón (2012), el ahuellamiento se causa principalmente por tres factores: mezcla (gradación del agregado, grado de funcionamiento PG del ligante, contenido de asfalto), carga (presión de llanta, tipo de eje) y ambiente (temperatura, humedad, precipitación) y por lo general se intenta controlar la resistencia a las deformaciones permanentes a través de la rigidez de las mezclas.

Mencionado lo anterior, se han generado diferentes metodologías y ensayos para evaluar las propiedades de los materiales que componen la mezcla asfáltica y prever un posible potencial frente al fenómeno de ahuellamiento. Es así como se tiene los ensayos de esfuerzo uniaxial o triaxial (ver **Figura 4**), que permiten obtener como resultado módulos y/o deformaciones; también, se tiene los ensayos de tracción indirecta, para evaluar el módulo resiliente y dinámico.

Figura 4

Equipo de Ensayo Triaxial Dinámico.



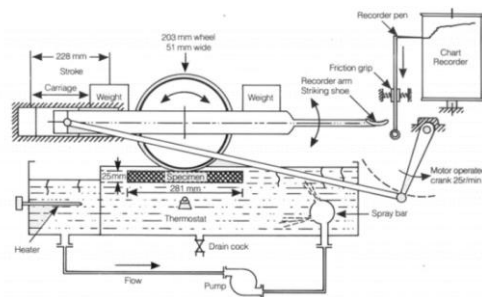
Nota: La figura representa el equipo de ensayo triaxial dinámico para mezclas asfálticas.

Fuente: <https://labic.ugr.es/laboratorio/ensayos/mezclas>

A su vez, se tiene ensayos a escala real o ensayos a pequeña escala, también conocidos como tipo *Wheel-Track*, estos permiten medir la deformación en una función de un número de ciclos aplicados con carga a una probeta de mezcla asfáltica como se observa en la **Figura 5**. En estas pruebas se emplean los equipos *Asphalt pavement alayzer (APA)*, *Wheel-Track* de Rueda de Hamburgo y *French pavement rutting tester (FPRT)*.

Figura 5

Equipo de Ensayo de Rueda Cargada.



Nota: La figura representa el esquema del Ensayo de rueda cargada (Wheel Tracking Test). Fuente: (Airey & Choi, 2002)

Por otro lado, los ensayos a escala real son un método que asegura la similitud del sistema de pavimento y de las cargas que en realidad tendrán que ser soportadas por la estructura, junto con el movimiento lateral de los vehículos y el uso de las velocidades reales de aplicación de carga (Rondón et al., 2012), sin embargo, estos métodos requieren una gran inversión económica y equipos sofisticados para la medición y cálculo de deflexiones y esfuerzos; haciendo que estos sean poco desarrollados en el mundo. Entre los ensayos en campo se resalta el *Texas Mobile Load Simulator (TxMLS)*, *National Airport Pavement Test Facility (NAPTF)*, Carruseles de fatiga del *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*, entre otros.

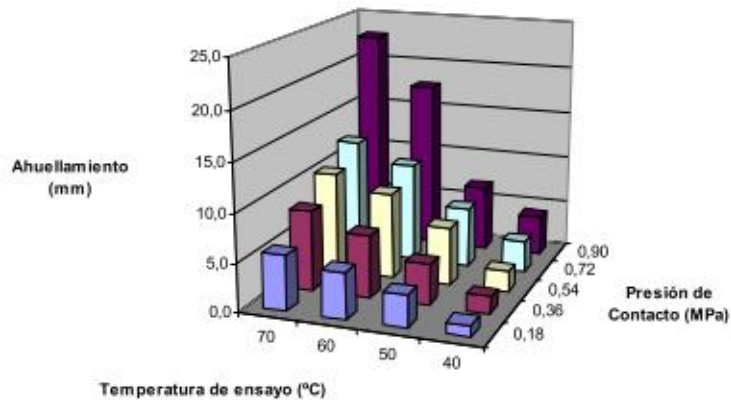
A continuación, se presentan referencias de los últimos años que muestran los estudios desarrollados en las mezclas asfálticas para evaluar el comportamiento a la falla por deformación permanente denominada ahuellamiento:

- Reyes, Reyes y Troncoso (2006), analizaron el efecto de la presión de contacto y la temperatura en las mezclas asfálticas frente al ahuellamiento. Para ello diseñaron una mezcla asfáltica densa con metodología Marshall y asfalto 60/70, a la cual evaluaron mediante el ensayo triaxial cíclico con confinamiento constante o ensayo de pista en laboratorio (INVÍAS, INVE-756, 1998), empleando temperaturas de 40, 50, 60 y 70° C con presiones de contacto de 0,18, 0,36, 0,54, 0,72 y 0,90 MPa. De lo anterior, obtuvieron que a mayor temperatura y presión se genera la condición más crítica o de mayor ahuellamiento en la capa asfáltica cómo se puede observar en la **Figura 6**, “resaltando la importancia de diseñar y evaluar la mezcla asfáltica en

términos de su ahuellamiento, de las leyes de fatiga y de su módulo con los parámetros reales a los cuales va a estar sometido el pavimento” (Reyes Ortiz et al., 2006).

Figura 6

Ahuellamiento versus presión de contacto y temperatura.



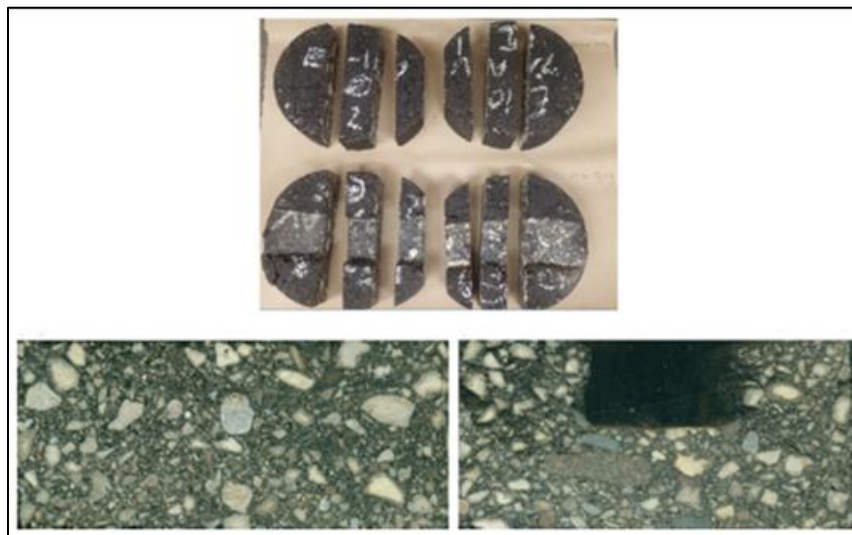
Nota: La Figura representa la Incidencia de la presión de contacto y la temperatura de ensayo en ahuellamiento. Fuente: (Reyes Ortiz et al., 2006)

- Las mezclas *Stone Mastic Asphalt (SMA)* han sido evaluadas por ahuellamiento, empleando pruebas dinámicas y ensayos a pequeña escala. En Pakistán, Hafeez, Ahmad y Mirza (2014) desarrollaron un estudio en el cual se probaron y evaluaron el módulo dinámico y el ahuellamiento *Wheel Tracking Test* a 4 mezclas SMA, con diferentes gradaciones de agregado, un mismo tipo de ligante, relleno y fibra. Tras realizar correlaciones a diferentes frecuencias de ensayos, el estudio reveló que existe una relación razonable entre el factor de ahuellamiento realizado por la rueda y el factor de módulo dinámico para las mezclas SMA, además se concluyó que el tamaño máximo del agregado y la temperatura de la mezcla tienen influencia significativa en el potencial de ahuellamiento.

- Por otro lado, Chaturabong y Bahia (2017) emplearon el ensayo a pequeña escala Rueda de Hamburgo en seco (Hamburgo Wheel Tracking, HWT) para analizar los mecanismos de ahuellamiento en la mezcla asfáltica; que, a su vez, fueron comparados con los resultados obtenidos del ensayo a escala real de Número de Flujo (FN). Dicha comparación se generó mediante el corte de las muestras en 6 secciones como se observa en la **Figura 7** y su procesamiento de imágenes en el sistema IPAS 2. Los resultados indicaron que las mezclas asfálticas en caliente bajo el ensayo HWT en seco muestran los mismos mecanismos de falla que se presentan en campo, evidenciando así que este ensayo es una alternativa efectiva para cuantificar el potencial de ahuellamiento, la cual tiene un bajo costo de equipamiento y está en capacidad de evaluar muestras que provenientes de campo y/o de laboratorio.

Figura 7

Imágenes de corte transversal de briquetas.

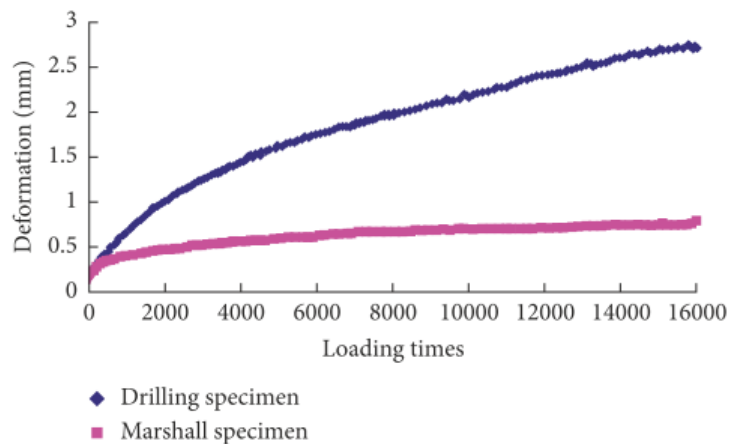


Nota: La figura Representa el Corte de briquetas y toma de fotografías transversales antes y después del ahuellamiento (Chaturabong & Bahia, 2017)

- También se han empleado técnicas no destructivas para evaluar el ahuellamiento, Estos permiten inspeccionar la reacción del material en su estructura interna y cuantificar las variaciones sufridas durante el ensayo. Wu, Li, Zhang y Minghui (2018), emplearon la tomografía computarizada para evaluar especímenes de mezcla asfáltica, unos tomados en campo y otros fabricados bajo metodología Marshall, antes y después de ser sometidas al ensayo de ahuellamiento *Rotary Loaded Wheel Tester* (RLWT), observando detalladamente el comportamiento del volumen de vacíos de aire y la variación del ángulo de orientación de los agregados. Los resultados demostraron que hay diferencias entre los resultados de estructura interna de los dos tipos de muestras debido a la distribución de vacíos y del esqueleto mineral, las cuales se reflejan en el ahuellamiento de las mezclas, siendo el espécimen de campo con mayor deformación como se observa en la **Figura 8**.

Figura 8

Deformación versus tiempos de carga.



Nota: La figura representa la relación entre deformación y tiempos de carga. Fuente: (Wu et al., 2018)

- Flores, Delgado y Gómez (2018) evaluaron el desempeño de mezclas asfálticas a deformación permanente empleando la Rueda de Hamburgo que es el equipo de mayor uso en México para diseño y control de calidad. Su trabajo lo desarrollaron con agregado de gradaciones de 12,0mm y 19,0mm para ser mezcladas con asfaltos PG 64 – 16 y 76 – 16, las cuales se sometieron a falla en el equipo Rueda de Hamburgo variando la condición de temperatura a 50, 55 y 60 °C. De lo anterior obtuvieron que el ensayo en condición de temperatura 50°C para todas las muestras presenta un comportamiento de deformación similar y uniforme; sin embargo, en temperaturas superiores se observó incremento en la deformación permanente siendo la mezcla con granulometría de 19,0 mm la que presenta mejor comportamiento a la deformación permanente en todas la temperaturas y combinaciones con los asfaltos.

- Pankholak, Plewa y Gardziejczyk (2021) evaluaron la influencia de emplear asfaltos modificados para observar la variación de los módulos de rigidez y ahuellamiento en las mezclas asfálticas de bajo ruido, ya que estas requieren mayor contenido de vacíos y por lo tanto se obtiene deterioro acelerado en las mismas. Para ello emplearon 6 tipos de mezclas asfálticas elaboradas con asfalto 50/70 y combinadas con estireno butadieno estireno (SBS) y caucho triturado (CR), a las cuales aplicaron ensayos de tensión indirecta para obtener módulos de rigidez y ensayos de doble rueda para obtener deformación permanente. Del estudio obtuvieron que los módulos incrementan notoriamente con la variación de aditivos y que las mezclas SMA presenta un mejor comportamiento al ahuellamiento.

2.2. Tomografía computarizada rayos-x.

La tomografía computarizada con rayos-X (TC R-X) es una técnica no destructiva que consiste en la adquisición de imágenes del interior de objetos sólidos usando rayos-X y su posterior análisis empleando algoritmos computacionales. Se considera que es un método eficaz para caracterizar la estructura interna de materiales porosos (Tashman et al., 2002)

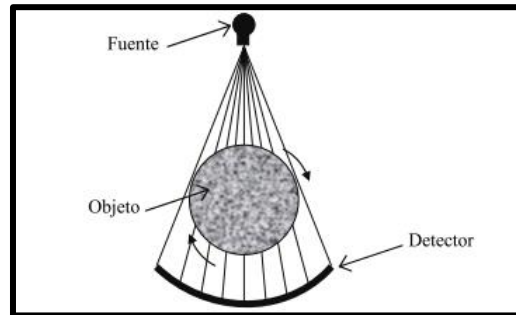
“La principal ventaja de esta técnica es que, al ser no destructiva, es posible utilizar los mismos especímenes en pruebas de laboratorio posteriores con el fin de determinar sus características mecánicas, físicas, o químicas” (Alvarez et al., 2008).

“En particular, la Tomografía Computarizada de rayos-X ha logrado centrar la atención de los ingenieros de pavimentos debido a que ofrece ventajas relacionadas con: su carácter de ensayo no destructivo, facilidad de uso, obtención rápida de resultados, y confiabilidad y repetitividad” (Álvarez et al., 2013).

Los componentes de la TC con rayos X, se pueden observar en la **Figura 9** que consisten en una fuente, un detector y la muestra de prueba colocada en el medio. “Para el estudio de mezclas asfálticas típicamente se emplean rayos colimados que cubren en su totalidad el ancho del objeto y una serie de detectores en línea” (Alvarez et al., 2008).

Figura 9

Esquema de partes de la Tomografía Computarizada Rayos-x.



Nota: La figura representa los componentes del sistema de tomografía computarizada rayos-x. Fuente: (Alvarez et al., 2008)

“Se dirigen rayos X en un plano que pasa a través del espécimen a lo largo de caminos diferentes y en varias direcciones produciendo el conjunto de imágenes de TC. La intensidad de los rayos X se mide antes de que entren en la muestra y después de que pasen a través de ella” (Masad et al., 2002).

De esta manera, mientras el objeto rota alrededor de su propio eje se adquieren múltiples vistas en todas sus posibles orientaciones, las cuales permiten la reconstrucción posterior de imágenes bidimensionales. Dichas imágenes se denominan secciones, ya que muestran la sección interior del objeto como si este hubiera sido cortado en un plano horizontal. Al finalizar el proceso, es posible visualizar y reconstruir el volumen completo utilizando el conjunto de secciones del espécimen obtenidas a diferentes alturas (Alvarez et al., 2008).

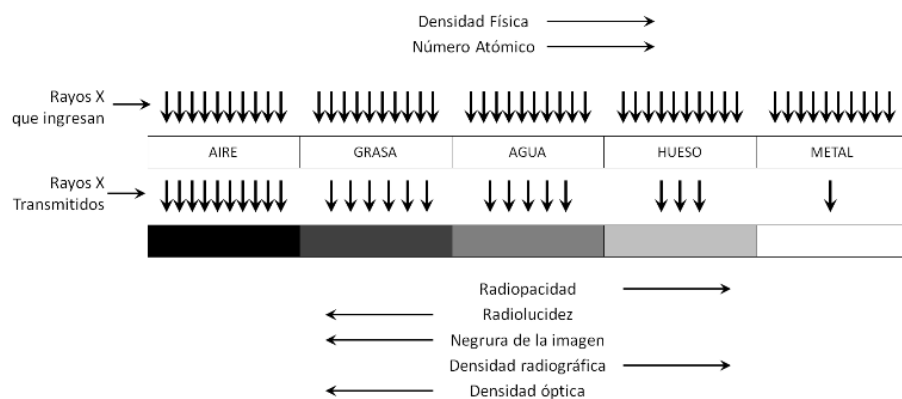
La TC de rayos X de la muestra da como resultado imágenes que muestran diferencias en la densidad en cada punto de los cortes bidimensionales a lo largo de la misma (Masad et al.,

2002). Lo anterior gracias a que la imagen de TC de rayos X resultante es un mapa de la distribución espacial del coeficiente de atenuación lineal. La diferenciación de características dentro de la muestra es posible porque el coeficiente de atenuación lineal en cada punto depende directamente de la densidad de los materiales que componen la muestra.

La información representada mediante una imagen está compuesta de píxeles que su vez se forman de acuerdo a la capacidad de absorción de los rayos X por el objeto y esta capacidad de absorción depende de las densidades del mismo. Donde, las sustancias de alta densidad absorben más rayos X y se representan en los tonos más claros o blancos y las sustancias de baja densidad absorben pocos rayos X representándose más oscuras o negro. Esto se puede apreciar en la **Figura 10**, donde se tiene que el aire, permite el paso del rayo directo y por tanto se caracteriza mediante el color negro, mientras que los elementos densos como lo son los huesos y el metal se presentan por grises claros y/o color blanco (Suyama & Jones, 2014).

Figura 10

Absorción de los rayos X por los distintos tejidos



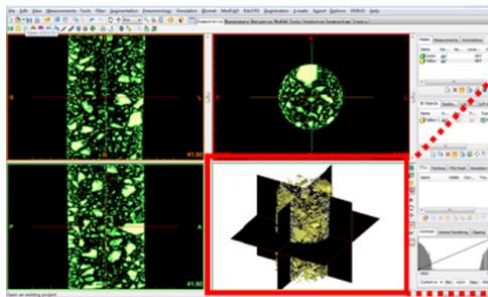
Nota: En la figura se observa el tono de grises de acuerdo a la densidad de un material.

Fuente: (Ciardullo, 2021)

“Una vez finalizado el procedimiento, las imágenes se transfieren a un modelo geométrico que incluye agregados, mastic de asfalto y vacíos de aire con la ayuda de técnicas de procesamiento digital de imágenes (DIP)” como se muestra en la **Figura 11** (Liu et al., 2017b).

Figura 11

Modelación de imágenes obtenidas mediante TC Rayos-X.

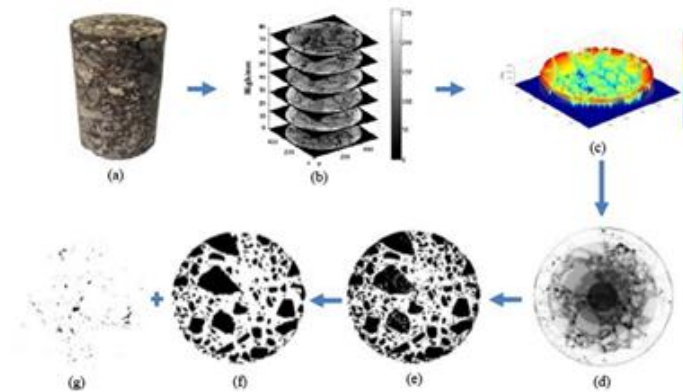


Nota: La figura representa la modelación de elementos triangulares a partir de las imágenes de TC- Rayos-X. Fuente: (Liu et al., 2017b)

Esta técnica ha ganado amplia aceptación en los últimos años y ha sido empleada exitosamente para analizar la microestructura de diversos materiales de construcción como se observa en la **Figura 12**. El mejoramiento de las técnicas de caracterización de materiales es un proceso continuo, motivado principalmente por el creciente desarrollo de nueva tecnología, la necesidad de reevaluar la validez de métodos existentes y el mejor conocimiento sobre los factores y mecanismos que afectan el comportamiento y respuesta de los materiales. Las técnicas de captura y procesamiento de imágenes constituyen un ejemplo de tecnologías innovadoras para la caracterización de materiales utilizados en la construcción de pavimentos, especialmente agregados y mezclas asfálticas (Masad et al., 2002).

Figura 12

Esquema de procesamiento de imágenes Rayos-X.



Nota: La figura representa el paso a paso de procesamiento de imágenes Rayos-X ((a) Probeta de mezcla asfáltica; (b) Conjunto de escaneos Rayos-X; (c) Análisis de distribución de escala de grises; (d) AOI dividida en regiones anulares; (e) Imagen binaria; (f) Agregados (>2,36 mm); (g) Vacíos con aire. Fuente: (Liu et al., 2017b).

En la **Figura 12** se puede observar el paso a paso del proceso de obtención de imágenes por medio de Tomografía Computarizada a una muestra de mezcla asfáltica, así como el procesamiento de la escala de grises de las mismas, para obtener la caracterización de vacíos con aire y agregados de la muestra en los modelos 2D y 3D.

A diferencia del campo de la medicina en el área de ingeniería de pavimentos la intensidad de los rayos-X y el tiempo de exposición empleados son normalmente mayores, lo que produce imágenes de mayor resolución (Alvarez et al., 2008). Cabe resaltar que esta técnica tiene dependencia del tiempo en laboratorio y de los costos de preparación de muestras de análisis. Por lo cual no se ha logrado tener un entorno totalmente virtual de simulación sin tener muestras reales del material evaluado.

A continuación, se presentan referencias que muestran avances en el campo del estudio de la estructura interna de mezclas asfálticas por medio de tomografía computarizada Rayos-X en los últimos años:

- Álvarez, et al (2008) emplearon la “Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados”. Estudiaron el contenido, tamaño, distribución y conectividad de los vacíos y la relación de estas variables con la susceptibilidad al deterioro por la presencia de humedad, la capilaridad y la permeabilidad de las mezclas empleando dos técnicas no destructivas basadas en la toma y procesamiento de imágenes: tomografía computarizada con rayos-X, y Sistema de Imágenes de Agregados. Encontrando que, para las mezclas asfálticas de gradación densa, la mayoría de vacíos tiene un tamaño inferior a los 3 mm de diámetro, que la distribución de vacíos no es uniforme al interior de la mezcla y que no todos los vacíos se encuentran interconectados, por lo cual se consideran como vacíos aislados e impermeables.

- Senior, et al (2014) hicieron el “Análisis y caracterización de una mezcla asfáltica, obtenida con mecanismos diferentes de compactación, a través de la técnica de tomografía computarizada CT”. Estudiando la compactación de una mezcla asfáltica caliente en laboratorio y en campo, a través del estudio de imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada de rayos X (TC). Encontrando significativas diferencias entre los parámetros de porosidad y permeabilidad o conductividad hidráulica para mezclas asfálticas que fueron compactadas a través de diferentes mecanismos, principalmente, en los dominios aire y mastic, cuya presencia

es mayor para mezclas asfálticas que fueron compactadas in-situ, empleando un mecanismo combinado de vibración-presión estática-amasado (compactador de llantas).

- Wu, et al (2018) hicieron la “Evaluación del test de ahuellamiento RLWT de mezclas asfálticas basada en Tomografía Computarizada Industrial”. En este estudio se analizó la imagen de CT antes y después de la prueba de ahuellamiento RLWT para un núcleo y una muestra Marshall. Se tomó el volumen de los vacíos de aire y se tomaron medidas de la orientación e inclinación de los agregados, empleando el método de Segmentación de Umbral de Anillo y Partición, que consiste en seccionar las imágenes en anillos y asignar diferentes umbrales de lectura a cada segmento para agrupar por densidades los componentes de la mezcla asfáltica, para luego combinar estas diferentes lecturas en una sola imagen. La variabilidad de los vacíos de aire del núcleo de perforación es mayor que la del espécimen Marshall, el valor de los vacíos de aire medido por el método de análisis de imagen es menor que el medido por el método estándar. En general, los dos tipos de especímenes, cuyas propiedades volumétricas y proporciones de mezcla son las mismas, tienen una distribución de material interno (partículas vacías y agregadas), parámetros macroscópicos de volumen e índices mecánicos diferentes.

- Cai, et al (2020) llevaron a cabo la “Evaluación de la propiedad de enclavamiento del esqueleto dual de pavimento semi-flexible mediante modelo micromecánico y Tomografía Computarizada Rayos-X”. Durante el estudio se evaluó cuanta proporción de cemento asfáltico funciona como aglutinante y cuanta actúa como parte del esqueleto aportando resistencias similares a las del agregado. Se propuso un método de clasificación de contactos, así como un método de cálculo de los contactos, definiendo así un índice de enclavamiento mecánico a partir

de un modelo micromecánico, el cual fue calibrado con la ayuda del procesamiento de imagen digital, mediante la técnica de exploración de Tomografía Computarizada Rayos-X. El estudio revela que la sexta parte de los contactos agregado-cemento asfáltico son efectivos, es decir que funcionan como mecanismo de transferencia de esfuerzos y que en promedio son la mitad de los contactos entre agregados gruesos del Pavimento Semi-Flexible. En la **Figura 13** se puede observar el paso a paso de la identificación, clasificación y contabilización de los contactos efectivos en la estructura interna de la mezcla asfáltica.

Figura 13

Proceso de cálculo de contactos efectivos del cemento asfáltico.

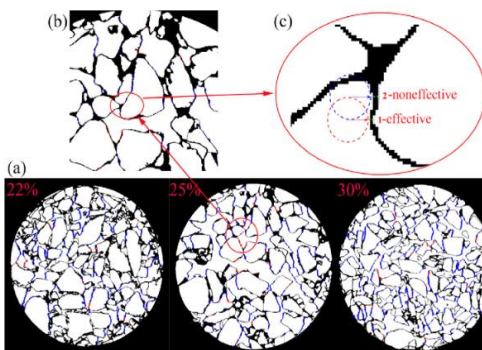


Fig. 2. Classification of cement-aggregate contacts in SF.

Nota: La figura representa la evaluación de contactos agregado-agregado de la mezcla asfáltica (Cai et al., 2020)

- Jin, et al (2022), hicieron el “Diseño virtual de mezclas asfálticas mediante un modelo de desarrollo y contacto basado en áridos realistas”. Durante este estudio se presenta una aproximación de la construcción virtual de muestras cilíndricas de mezcla asfáltica, para simular la estructura interna de la misma como se muestra en la **Figura 14**. Se empleo para la modelación virtual una biblioteca digital de agregados reastas, obtenida por medio de

Tomografía computarizada Rayos-X. Se construyeron tres muestras de mezcla asfáltica, como se muestra en el ejemplo de simulación de la y se encontró que tienen una cantidad, área y orientación de agregados muy cercanas a una muestra de mezcla asfáltica real. Adicional a lo anterior se hicieron simulaciones de deformación controlada en las muestras virtuales, encontrándose diferentes resistencias para cada una, observándose que la resistencia mejora entre más contacto entre agregados tenía cada muestra virtual, validándose así también la modelación de ensayos de resistencia que se hacen en la realidad.

Figura 14

Modelo simulación de agregados.

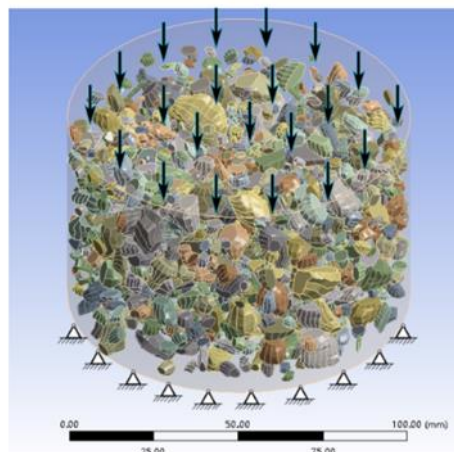


Fig. 8. Set-up of simulation.

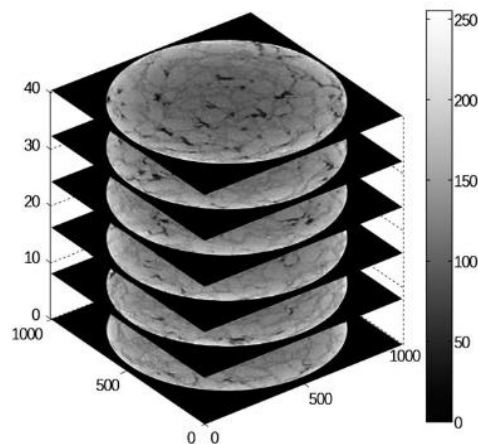
Nota: La figura representa la simulación de agregados en la mezcla asfáltica. Fuente: (Jin et al., 2022).

- Li, et al (2022), hicieron el “Análisis microestructural de los efectos de la compactación en las propiedades de fatiga de mezclas asfálticas”. En este estudio, se tomaron núcleos de mezcla asfáltica de una pista de prueba y se realizó la prueba de fatiga por tracción indirecta para

estudiar las propiedades de fatiga. Se utilizó el procesamiento de imágenes digitales (DIP) para investigar los cambios microestructurales de las muestras de asfalto en función de las imágenes de Tomografía Computarizada de rayos X (CT de rayos X), **Figura 15**. Se determinaron la orientación del agregado y el número de puntos de contacto del agregado. La distribución del contenido de vacíos de aire y el índice de forma de los vacíos de aire antes y después de las pruebas de fatiga. De acuerdo con los resultados, el análisis microscópico puede predecir efectivamente la evolución de las estructuras internas de las mezclas asfálticas durante el daño por fatiga. La heterogeneidad debida a los diferentes grados de compactación afecta significativamente las propiedades de fatiga de las mezclas asfálticas.

Figura 15

Reconstrucción de imágenes obtenidas con Rayos-X con escala de grises.



Nota: La figura representa la secuencia de escala de grises de imágenes seleccionadas.

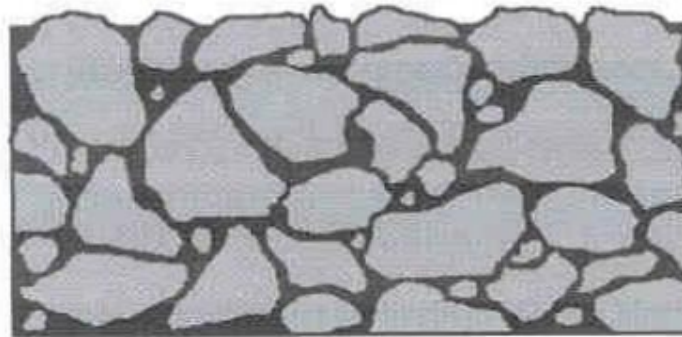
Fuente: (Li et al., 2022)

2.3. Mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt (SMA).

Las mezclas *Stone Mastic Asphalt* (SMA) se originaron en los años sesenta en Alemania (Nikolaides, 2000), especialmente con el fin de soportar el tránsito de ruedas con clavos durante las temporadas de invierno y en general mejorar la resistencia al ahuellamiento. Gracias a su desempeño y durabilidad, estas mezclas se hicieron conocidas y empezaron a ser empleadas en diferentes países. Las SMA se caracterizan por tener una alta resistencia al tráfico pesado y son producto de un diseño óptimo que permite tener altos contenidos de bitumen y bajos contenidos de vacíos como se muestra en la **Figura 16**, mientras la misma soporta tránsitos altos y temperaturas críticas de servicio manteniendo su resistencia a la deformación permanente estable.

Figura 16

Gráfico de Mezcla Stone Mastic Asphalt.



Nota: La figura representa el gráfico de corte transversal de mezcla SMA. Fuente: (Joubert et al., 2004).

Por otro lado, los aditivos o estabilizadores empleados para las mezclas SMA corresponden a fibras orgánicas, fibras minerales, polímeros ya sean en forma granular o en polvo para garantizar estabilidad y prevenir el escurrimiento de mortero en los agregados, asegurando homogeneidad en la mezcla. el aditivo comúnmente usado corresponde a fibra de celulosa, **Figura 18** (Obert, 2000).

Figura 18

Fibra Celulosa.



Nota: La figura representa pallets de Fibra celulosa. Fuente Propia

Teniendo en cuenta la particularidad de los elementos que componen la mezcla SMA, su resistencia a la deformación se ha probado durante muchos años, desarrollando innumerables métodos de evaluación, desde los más simples y más antiguos, como una evaluación basada en la estabilidad Marshall, hasta sofisticados métodos de prueba actualizados que incluyen ensayos efectuados en equipos triaxiales dinámicos (Blazejowski, 2011).

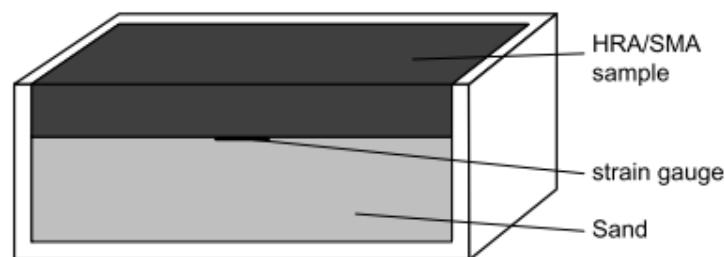
A continuación, se presentan referencias que muestran avances en el campo de evaluación de composición y/o comportamiento en mezclas SMA en los últimos años:

- Ulmgrem (1996) estableció correlaciones entre la prueba de fluencia dinámica y el ensayo Wheel Tracking.
- Said (2000) comparó el impacto de soporte lateral en pruebas de fluencia de SMA y AC, encontrando mejor comportamiento en las SMA.

- En Gran Bretaña, Obert (2000) evaluó los esfuerzos horizontales de una mezcla SMA comparado con una mezcla asfáltica laminada en caliente (HRA) empleadas como superficie en un molde que se elaboró para acondicionar una capa de arena con 70 mm de espesor y la respectiva mezcla con espesor de 30 mm, como se observa en la **Figura 19**. Para el desarrollo del estudio se empleó la prueba Wheel tracking test, con la llanta de caucho y cargas variables de 190 N, 280 N y 370, la cual se pasó sobre las mezclas controlando temperatura a 60°C, además se leyó la deformación instalando medidor en medio de las capas que conforman las estructuras. A lo anterior, se encontró que bajos las condiciones y variables empleadas, las mezclas SMA presentaron menor deformación y menor esfuerzo horizontal comparado a las mezclas HRA.

Figura 19

Espécimen para ensayo de Wheel Tracking.

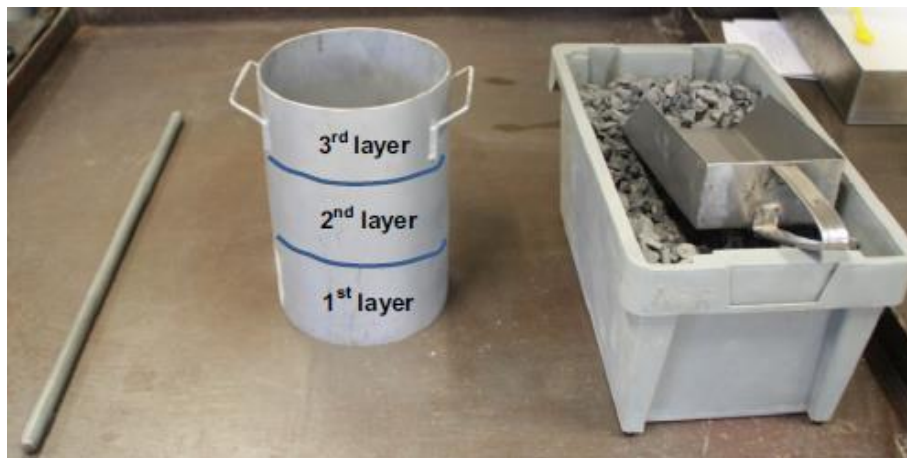


Nota: La figura representa la muestra a ensayar en prueba Wheel tracking test de mezcla HRA o SMA. Fuente: (Obert, 2000).

- En la Universidad de Lisboa, analizaron que el método para determinar peso unitario en los agregados también conocido como “*manually dry-rodded method*”, ver **Figura 20**, mediante el cual se evalúa el empaquetamiento de los agregados en las mezclas SMA, no representa las condiciones en campo, lo que puede comprometer el desempeño de estas mezclas. Por lo tanto, tomaron tres materiales y los compactaron mediante 5 métodos: “sin compactación”; método de “varilla en seco manual”; compactación Proctor establecida; compactación Proctor modificada (compactación ligera y pesada) y compactación con rodillos de acero. De lo cual obtuvieron que los dos últimos métodos mencionados y denominados “nuevos” generan un empaquetamiento representativo a la compactación en campo y por tanto un mejor comportamiento a la deformación permanente (Manuel et al., 2020).

Figura 20

Equipo para ensayo de peso unitario.



Nota: La figura representa el equipo del ensayo manually dry-rodded method y muestra de capas a compactar. Fuente: (Manuel et al., 2020)

- En Finlandia, Kelkka y Valtonen (2000) evaluaron tramos de prueba, donde se compararon las mezclas SMA elaboradas con cementos asfáltico convencional y con varios tipos de ligantes asfálticos como “duros” y gilsonita. A lo anterior, encontraron que todas las SMA elaboradas con un aglutinante diferente al tradicional presentaron mejor comportamiento a las deformaciones plásticas.
- Cooley y Brown (2003) desarrollaron una investigación en E.E.U.U sobre mezclas de SMA utilizadas para superficies de desgaste fino donde se demostraron las ventajas de cumplir con los requisitos de resistencia a la deformación, según las pruebas de Analizador de Pavimento Asfáltico, APA.

“En la mayoría de las especificaciones de diseño, entre las cuales está la especificación alemana de 1984, el diseño de la mezcla SMA es basado generalmente en las propiedades volumétricas de los especímenes compactados de Marshall. Los requerimientos volumétricos, la gradación de los agregados y el contenido de bitumen varían de acuerdo a los requerimientos de las especificaciones nacionales de cada país” (Nikolaides, 2000).

Hoy en día las mezclas SMA son consideradas como una mezcla ideal para pavimentos de servicio pesado que aportan mayor resistencia al daño y una vida útil más larga.

3. Metodología

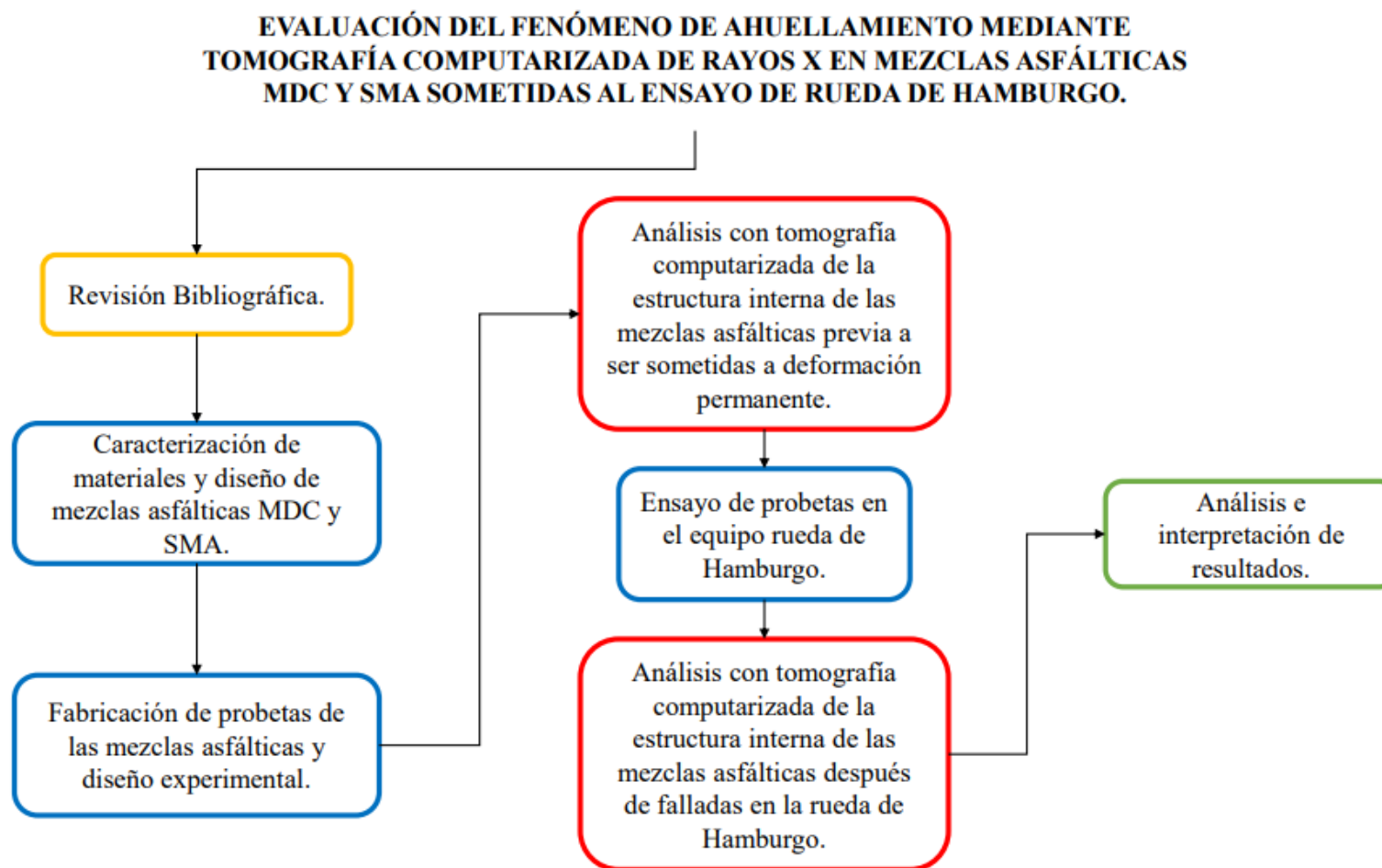
Con el fin de comprobar la hipótesis general de este trabajo de investigación “El empleo de la tomografía computarizada con rayos X permitirá observar las diferencias que se presentan entre la deformación plástica de una mezcla SMA y una MDC evaluadas en el equipo Rueda de Hamburgo”, en el presente estudio se llevaron a cabo procedimientos de diseño, fabricación de muestras, pruebas de especímenes en laboratorio y análisis de imágenes digitales, todos bajo las especificaciones y normas que los rigen.

En la **Figura 21** se presenta esquema de fases para el desarrollo del proyecto, distribuidas de la siguiente manera:

- Color Amarillo: Revisión de literatura.
- Color Azul: Recopilación de datos
- Color Rojo: Procesamiento de datos.
- Color Verde: Análisis y Conclusiones.

Figura 21

Esquema metodología



Nota: La figura representa el esquema de Metodología del trabajo de profundización. Fuente: Elaboración propia

A continuación, se detallan las siguientes fases desarrolladas:

3.1. Revisión bibliográfica.

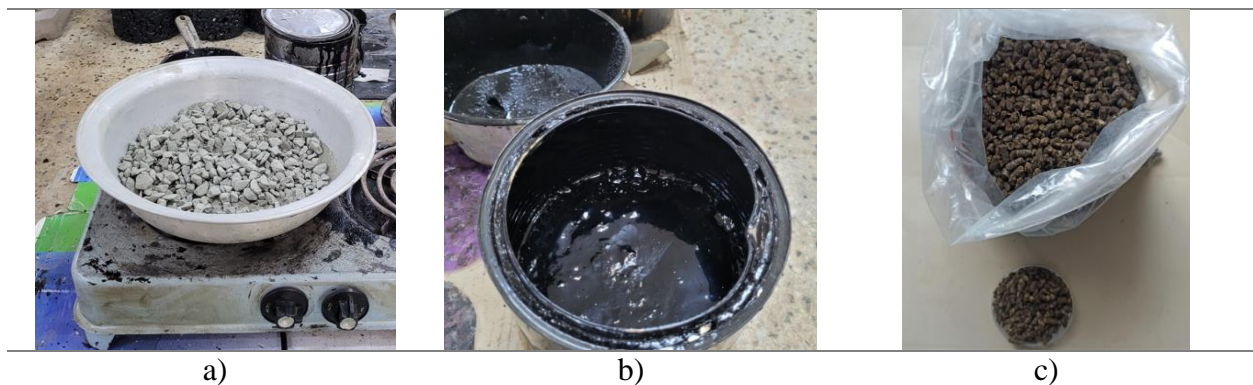
Se recopiló información de avances investigativos de temas relacionados al ahuellamiento del concreto asfáltico, Tomografía Computarizada Rayos -X y mezclas asfálticas tipo Stone Mastic Asphalt, con el fin de conocer el estado del arte actual y obtener referentes suficientes para encaminar el proceso del presente trabajo de grado.

3.2. Fase 1: Caracterización de materiales y diseño de mezclas asfálticas MDC y SMA.

Los materiales para la fabricación de las mezclas asfálticas (MDC y SMA) empleados para el presente estudio se muestran en la **Figura 22**.

Figura 22

Materiales de mezclas asfálticas MDC y/o SMA.



Nota: La figura a) corresponde al material granular, b) al asfalto y c) a la fibra celulosa.

Fuente: Elaboración Propia

Estos materiales corresponden a

- Agregados pétreos suministrados por la Planta de Producción Cachibí S.A
- Cemento asfáltico suministrado por planta de asfaltos Humberto Quintero O y Cia SCA.
- Fibra Celulosa suministrada por Surfex Colombia.

Los ensayos de calidad se desarrollaron en los laboratorios de CITEC Ltda. y/o Universidad del Cauca, y los parámetros que no pudieron ser evaluados a nivel laboratorio fueron adoptados de las informaciones entregadas por planta de producción de materiales Cachibí y/o Humberto Quintero.

Las metodologías de diseño de las mezclas empleadas corresponden a:

- Metodología Marshall para la MDC, siguiendo el Artículo 450 – 13 del capítulo 4 de las Especificaciones de Construcción de Carreteras (Invias, 2013a)
- Metodología “Stone-to-stone” para la SMA, siguiendo las guías SMA QIS 122 (NAPA, 2002) y las normas Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA) M 325 (AASHTO, 2008b) y Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt R46 (AASHTO, 2008a).

Para el caso de las mezclas MDC, se empleó un diseño existente, el cual fue chequeado y para las mezclas SMA, se desarrolló el proceso de diseño desde cero. Las dos condiciones planteadas se presentan a continuación:

3.2.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC).

Para la mezcla asfáltica tipo MDC se trabajó con un diseño elaborado por Cachibí S.A para el CONSORCIO METROVIAL SB en el mes de junio de 2019, que corresponde a una mezcla densa en caliente MDC 19, razón por la cual, las actividades desarrolladas en las mezclas MDC corresponden a:

Caracterización de materiales

Chequeo de diseño.

3.2.1.1. Caracterización de materiales.

Para la caracterización de los materiales, se consolidaron los resultados de laboratorio reportados por las plantas de producción de agregados minerales Cachibi S.A y de asfalto Humberto Quintero, que, a su vez, emplearon las especificaciones técnicas referidas en **Tabla 1** para los agregados minerales y tablas **Tabla 2** y **Tabla 3** para el asfalto.

a. Agregados minerales:

Tabla 1

Especificaciones para la caracterización de los agregados de la mezcla MDC.

PROPIEDAD	NOMBRE DE LA NORMA	NORMA
Dureza en el agregado grueso	Resistencia a la Degradación de los agregados de tamaño menores de 37,5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los Ángeles	E – 218 (Invias, 2012a)
	Determinación de la resistencia del agregado grueso a la degradación por abrasión, utilizando el aparato Micro – Deval.	E – 238 (Invias, 2012c)
Durabilidad	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio	E- 220
Limpieza	Determinación de límite líquido de los suelos	E - 125
	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	E - 126
	Equivalente de arena de suelos y agregados finos	E - 133
Cubrimiento y adherencia	Adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel – weber)	E - 774

Nota: La tabla presenta las especificaciones empleadas para determinar las propiedades

de los agregados componentes en la mezcla MDC. Fuente: Elaboración Propia.

b. Cemento Asfáltico:

Tabla 2.

Especificaciones para la caracterización del asfalto Original

NOMBRE DE LA NORMA	NORMA
Penetración de los materiales bituminosos.	E – 706 (Invias, 2012e)
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).	E – 712 (Invias, 2012g)
Índice de penetración de los cementos asfálticos.	E – 724 (Invias, 2012k)

Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío o determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional.	E - 716 o E – 717 (Invias, 2013f)
Ductilidad de los materiales asfálticos.	E – 702 (Invias, 2012l)
Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno.	E – 713 (Invias, 2012h)
Agua en los materiales asfálticos por destilación.	E – 704 (Invias, 2012d)
Puntos e inflamación de asfaltos líquidos mediante la copa abierta tag.	E – 709 (Invias, 2012f)
Determinación del contenido de parafinas en ligantes asfálticos.	E – 718 (Invias, 2012j)

Nota: La tabla presenta las especificaciones empleadas para caracterizar el asfalto original. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3

Especificaciones para la caracterización del asfalto Residual

NOMBRE DE LA NORMA	NORMA
Efectos del calor y del aire sobre el asfalto sobre el asfalto en lámina delgada y rotatoria.	E – 720
Penetración de los materiales bituminosos.	E – 706 (Invias, 2012e)
Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).	E – 712 (Invias, 2012g)
Determinación de la viscosidad del asfalto empleando viscosímetros capilares de vacío o determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional.	E - 716 o E – 717 (Invias, 2012i)

Nota: La tabla presenta las especificaciones empleadas para caracterizar el asfalto Residual. Fuente: Elaboración Propia

3.2.1.2. Chequeo de diseño.

En el proceso de chequeo de diseño, empleando norma INVIAS E - 748 (Invias, 2013j) se fabricaron cuatro (4) briquetas tipo Marshall con el fin de verificar la fórmula de diseño

mediante el ensayo de Estabilidad y Flujo empleando la máquina Marshall disponible en el laboratorio de suelos Citec Ltda, la cual se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23

Equipo Marshall para evaluación de Estabilidad y Flujo en el Laboratorio CITEC.



Nota: En la figura se puede observar el proceso de ensayo de laboratorio de estabilidad y flujo que se desarrolló a las 4 muestras de mezcla tipo MDC-19 para chequeo de diseño Marshall. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)

Para la mezcla asfáltica tipo SMA se llevó a cabo el proceso de caracterización de materiales, con el fin de verificar el cumplimiento de los requisitos mínimos de calidad y posteriormente se desarrolló el proceso de diseño de la mezcla bajo la metodología NAPA.

3.2.2.1. Caracterización de materiales.

Para la caracterización de materiales se evaluaron ensayos de calidad en los laboratorios de suelos Citec Ltda y de la Universidad del Cauca con el fin de verificar el cumplimiento con las especificaciones técnicas referidas en las **Tablas Tabla 4 y**

Tabla 5 para los agregados minerales. A su vez, para los materiales asfalto y fibra celulosa se consolidó información suministrada por la planta de asfaltos Humberto Quintero y el proveedor de Fibra Celulosa Surfax.

a. Agregados minerales:

Tabla 4

Normas de ensayo para la caracterización de los agregados gruesos de la mezcla SMA.

PROPIEDAD	NOMBRE DE LA NORMA	NORMAS
Dureza	Resistencia a la Degradación de los agregados de tamaño menores de 37,5 mm (1 ½”) por medio de la máquina de los Ángeles	E – 218 (Invias, 2012a)
Durabilidad	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio	E – 220 (Invias, 2012b)
Caras Fracturadas	Porcentaje de partículas fracturadas en un agregado grueso	E – 227 (Invias, 2012m)
Absorción	Densidad y absorción del agregado grueso.	E – 223 (Invias, 2013d)

Nota: La tabla presenta las Normas de ensayo empleadas para caracterizar los agregados gruesos componentes en la mezcla SMA. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5

Normas de ensayo para la caracterización de los agregados finos de la mezcla SMA.

PROPIEDAD	NOMBRE DE LA NORMA	NORMAS
Durabilidad	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio	E – 220 (Invias, 2012b)
Angularidad	Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría)	E – 239 (Invias, 2013e)
Limpieza	Determinación de límite líquido de los suelos	E - 125
	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	E - 126

Nota: La tabla presenta las Normas de ensayo empleadas para caracterizar los agregados finos componentes en la mezcla SMA. Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 24**, se observa ilustraciones de los diferentes ensayos referidos en la **Tabla 5** y desarrollados a los agregados empleados en la mezcla SMA; la imagen a) corresponde a dureza por medio de máquina de los Ángeles, b) de durabilidad por medio de solidez con solución de sulfato de sodio, c) límites de Atterberg y d) gravedad específica en los finos.

Figura 24

Ensayos de laboratorio a agregados minerales





c)



d)

Nota: Fotografías de ensayos desarrollados a mezcla SMA 12,5.

b. Cemento Asfáltico

El tipo de ligante empleado en la fabricación de la mezcla SMA 12,5, que corresponde al material utilizado en las mezclas MDC 19. Esto considerando que las guías de diseño no condicionan una especificación puntual respecto al ligante a trabajar, y por tanto la revisión bibliográfica recomienda utilizar un asfalto que cumpla con las necesidades del proyecto en cuanto a temperatura y cargas.

c. Fibra Celulosa

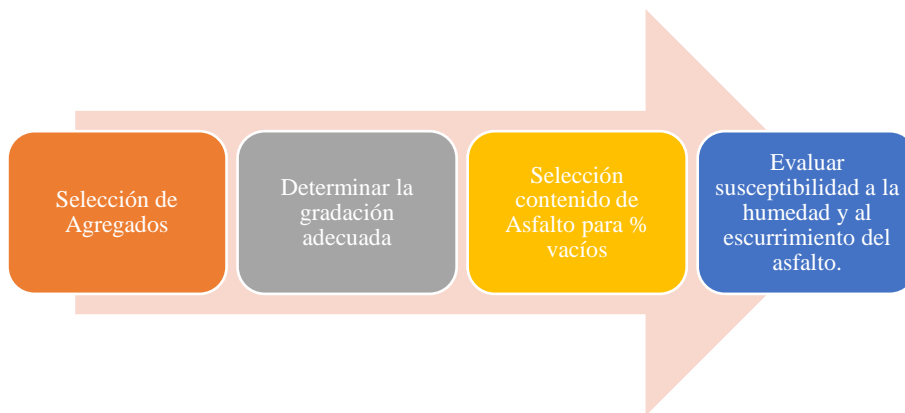
En la definición del material aditivo y/o estabilizador, se trabajó con la fibra celulosa, un aditivo comúnmente usado por sus propiedades de absorción, que fue seleccionado con el fin de mitigar el efecto de escurrimiento en la mezcla, por los altos contenidos de cemento asfáltico que se manejan.

3.2.2.2. Diseño de mezcla SMA

El proceso de diseño planteado para la mezcla SMA se fundamenta en la metodología NAPA, y cuyo proceso se puede visualizar en el diagrama de flujo de la **Figura 25**.

Figura 25

Procedimiento de diseño mezcla SMA.



Nota: Proceso para diseño de mezcla SMA traducido de la guía Designing and Construcción SMA Mixtures—State-of-the-Practice. Fuente: (NAPA, 2002).

En el diseño de la mezcla SMA, el concepto de tamaño máximo nominal varía con respecto al definido en el diseño de la mezcla MDC, como se explica en la siguiente tabla:

Tabla 6

Tamaño máximo nominal.

Mezcla Densa en Caliente	Mezcla Stone Mastic Asphalt
Se clasifican de acuerdo con Tamaño máximo nominal	
Tamaño máximo Nominal del agregado: Menor abertura de tamiz a través de la cual se permite que pase la totalidad del agregado.	El tamaño máximo nominal del agregado: Abertura del tamiz inmediatamente mayor al primero que retiene más de 10% del agregado.

(Invias, 2013c)		(NAPA, 2002)	
MDC 19mm		SMA 12,5mm	
GRANULOMETRÍA		GRANULOMETRÍA	
TAMIZ (mm)	% PASA	TAMIZ (mm)	% PASA (G1)
		25	100
19	100	19	100
12,7	90	12,5	96
9,5	76	9,5	50
4,75	57	4,75	24
2	36	2,36	18
0,43	17	1,18	16
0,18	11	0,6	14
0,08	5,1	0,3	12,8
Fondo	0	0,075	9

Nota: La tabla muestra el concepto de tamaño máximo nominal en mezclas. Fuente:

Elaboración propia.

Al analizar la **Tabla 6**, se puede observar que el diámetro máximo de las partículas de agregados que tendrá la mezcla SMA corresponderá a 12,5 mm, dado que es el tamiz inmediatamente superior al cual se retendrá más del 10% del agregado, evitando que el tamaño sea otra variable entre las mezclas objeto de análisis.

a. Selección De Agregados:

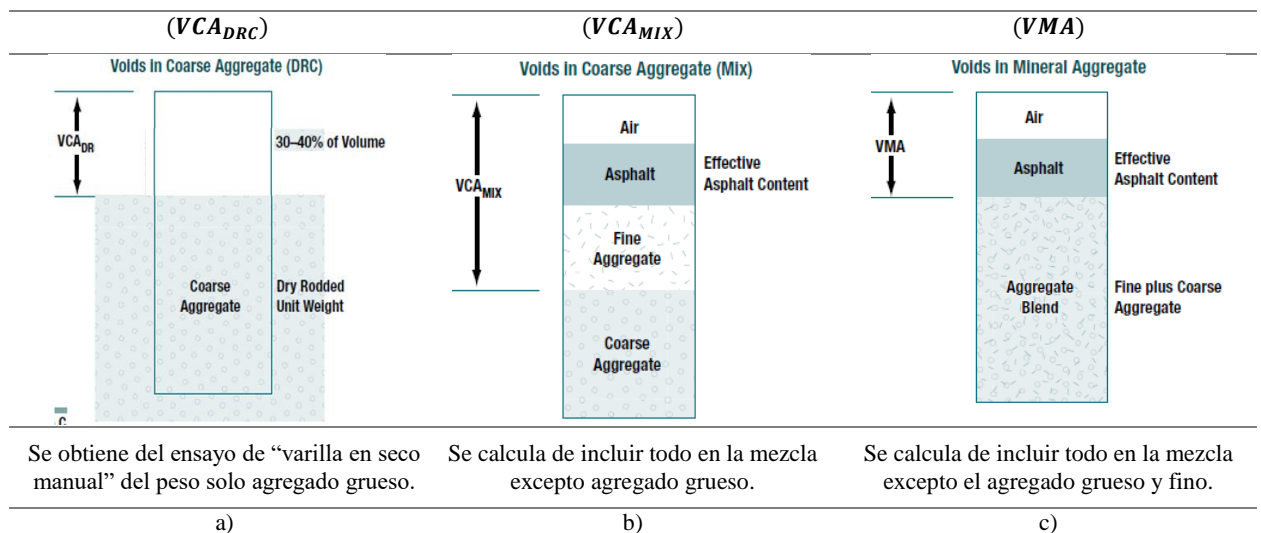
Como se indicó previamente, los materiales a emplear en la elaboración de la mezcla SMA 12,5 corresponden a los materiales empleados en la mezcla MDC 19, cabe mencionar que el agregado granular debe cumplir con los requisitos establecidos para el diseño de mezclas SMA según la guía NAPA.

b. Determinar la gradación adecuada,

La principal característica de las mezclas SMA corresponde a “contacto piedra a piedra”, el cual se cumple siempre que los vacíos en la fracción gruesa del agregado sean mayores a los vacíos del agregado en la fracción gruesa de la mezcla asfáltica. Para entender este concepto, a continuación, se presenta en la **Figura 26**.

Figura 26

Definición de vacíos en la mezcla asfáltica y el agregado.



Nota: En la imagen a) Vacíos en la fracción gruesa del agregado b) Vacíos en el agregado grueso de la mezcla c) Vacíos en el agregado mineral. Fuente: (NAPA, 2002)

En la **Figura 26** se observa el (VCA_{DRC}) que corresponde a los vacíos que puede contener la fracción gruesa del agregado bajo una condición de compactación. (VCA_{MIX}) hace referencia a los vacíos de la fracción gruesa que se generan en la mezcla asfáltica y finalmente (VMA) tiene los vacíos de la granulometría en la mezcla asfáltica. Fuente: (NAPA, 2002)

Mencionado lo anterior, para cumplir el criterio de contacto piedra a piedra, se debe cumplir con la franja de especificación definida de acuerdo al tamaño máximo nominal de la mezcla SMA a trabajar, la cual se toma de la especificación de la guía metodológica como se presenta en la **Figura 27**.

Figura 27

Especificación de las bandas granulométricas para mezclas Stone Mastic Asphalt

Sieve size, mm	*25 mm NMAS ¹		19 mm NMAS		12.5 mm NMAS		9.5 mm NMAS		*4.75 mm NMAS	
	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
37.5	100	100								
25.0	90	100	100	100						
19.0	30	86	90	100	100	100				
12.5	26	63	50	74	90	100	100	100		
9.5	24	52	25	60	26	78	90	100	100	100
4.75	20	28	20	28	20	28	26	60	90	100
2.36	16	24	16	24	16	24	20	28	28	65
1.18	13	21	13	21	13	21	13	21	22	36
0.6	12	18	12	18	12	18	12	18	18	28
0.3	12	15	12	15	12	15	12	15	15	22
0.075	8	10	8	10	8	10	8	10	12	15

Nota: En la Figura se observa límites superior e inferior de las granulometrías a emplear según tamaño máximo nominal de la mezcla SMA. Fuente: (NAPA, 2002)

Para la definición de la gradación a trabajar y considerando lo relevante que es la fracción gruesa del agregado, se debe evaluar con los materiales seleccionados varias granulometrías, en el caso del presente trabajo se definieron 3 granulometrías denominadas G1, G2 y G3, las cuales se encuentran dentro de la banda granulométrica resaltada en la **Figura 27** y se le determinaron los siguientes parámetros:

Determinación de vacíos (VCA), gravedad específica bulk seca y densidad bulk en la fracción del agregado grueso.

Para determinar los vacíos en la fracción gruesa del agregado (VCA_{DRC}), es necesario determinar la fracción gruesa de una mezcla SMA definida como aquella porción de la mezcla total de agregados retenida en el tamiz de “Rotura”, y este a su vez es definido de acuerdo al tamaño máximo nominal de la mezcla, como se observa en la **Tabla 7** tomada de la Guía de metodología de la Napa que a continuación se presenta:

Tabla 7

Definición de la fracción del agregado grueso.

Tamaño nominal máximo del agregado		Fracción del agregado retenido en el tamiz de rotura	
mm	In	mm	In
25	1	4,75	# 4
19	3/4	4,75	# 4
12,5	1/2	4,75	# 4
9,5	3/8	2,36	# 8
4,75	# 4	1,18	# 16

Nota: La tabla da a conocer el Tamiz de Rotura de acuerdo a tamaño máximo nominal de la mezcla. Fuente: (NAPA, 2002)

De acuerdo a la **Tabla 7** y para mezclas con tamaño máximo nominal 12,5 mm o ½”, el tamiz de rotura corresponde a 4,75 mm o #4.

Como el material empleado para las gradaciones G1, G2 y G3 corresponde a una sola fuente y a su vez, estas son similares, se puede determinar (VCA_{DRC}) para una sola de las mezclas de agregados a trabajar. Este proceso requiere definir la gravedad específica bulk seca (Invias, 2013d) y densidad bulk (Invias, 2013b) y así obtener los vacíos de las fracciones del

agregado grueso, empleando la ecuación (1), Vacíos en la fracción gruesa del agregado (VCA_{DRC}).

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{G_{CA} \cdot \gamma_W - \gamma_S}{G_{CA} \cdot \gamma_W} \right) * 100 \quad (1)$$

Donde:

VCA_{DRC} = Vacíos de la fracción del agregado grueso.

G_{CA} = Gravedad específica bulk seca.

γ_W = Densidad del agua.

γ_S = Densidad bulk de los agregados.

Determinación de vacíos del agregado mineral (VMA) y % de vacíos de la mezcla asfáltica:

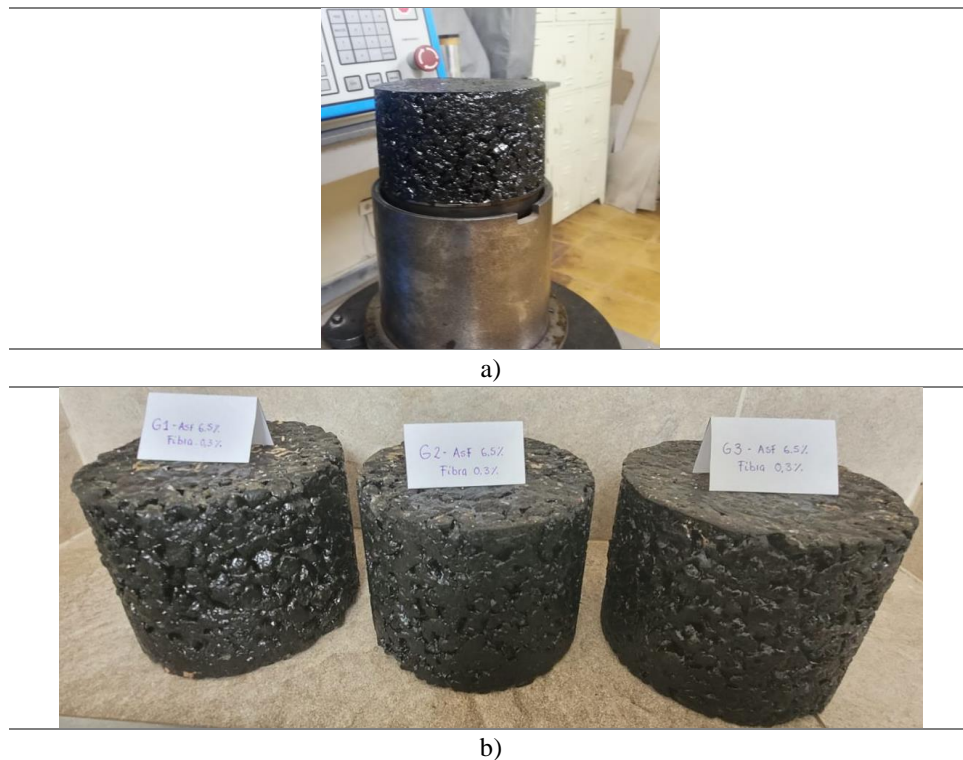
Para definir los parámetros VMA (Vacíos del agregado mineral) y % Vacíos, se deben elaborar briquetas de mezcla asfáltica. La Guía Metodológica de la Napa, establece que se debe garantizar un contenido de asfalto mínimo de 6%. Por lo cual recomienda trabajar con contenidos de asfalto cercano al porcentaje mencionado para determinar cuál presenta mejor comportamiento con los criterios de funcionalidad de la mezcla.

Adicional, se tiene que, a mayor cantidad de ligante, se genera menor % de vacíos y mencionados los indicios, se procede a revisar las gradaciones con un contenido de asfalto preliminar de 6,5% respecto al peso de la mezcla, dado que este punto de partida genera datos claves para comparar las gradaciones establecidas.

A continuación, se fabricaron briquetas con diámetro de 150 mm y altura de 115 mm en compactador giratorio Superpave a 100 giros para las gradaciones G1, G2 y G3, asfalto 6,5% y fibra celulosa de 0,3 % las cuales se pueden observar en la **Figura 28**.

Figura 28

Briquetas para selección de gradación en mezcla SMA.



Nota: La figura presenta en a) la muestra después de ser compactada en el compactador giratorio SUPERPAVE y en b) las muestras elaboradas con las gradaciones G1, G2 y G3.

Fuente: Elaboración Propia.

A las muestras elaboradas, se le deben determinar los Vacíos en el agregado mineral) y Vacíos con aire de la mezcla asfáltica, mediante las ecuaciones (2) y (3).

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}} * P_s \right) \quad (2)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica bulk de total del agregado

G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla (Invias, 2013h).

P_s = Porcentaje de agregado en la mezcla.

$$Va = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (3)$$

Donde:

G_{sb} = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla (Invias, 2013i).

G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla.

Determinación de vacíos en el agregado grueso de la mezcla (VCA_{MIX}).

Para determinar los vacíos del agregado grueso de la mezcla asfáltica mediante la ecuación (5) (NAPA, 2002), se debe determinar previamente el Porcentaje de agregado por total de peso en la mezcla retenido en el tamiz de rotura, mediante la ecuación (4) (NAPA, 2002).

$$P_{bp} = (P_s)(PA_{bp})100 \quad (4)$$

Donde:

P_{bp} = Porcentaje de agregado por total de peso en la mezcla retenido en el tamiz de rotura.

P_s = Porcentaje de agregado en la mezcla.

PA_{bp} = Porcentaje de agregado por total de peso del agregado retenido en tamiz de rotura, expresado como un decimal.

$$VCA_{mix} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} * P_{bp} \right) \quad (5)$$

Donde:

G_{ca} = Gravedad específica bulk del agregado grueso (NAPA, 2002)

G_{mb} = Gravedad específica bulk de la mezcla.

Una vez calculados los parámetros de (VCA_{DRC}), (VCA_{MIX}) y VMA en las mezclas SMA se deben cumplir con los siguientes criterios para la selección de la gradación de diseño:

1. $VMA > 17 \%$ and $VCA < VCADRC$
2. Porcentaje de vacíos cercanos a 4%.

La Guía Metodológica de la Napa (NAPA, 2002) recomienda 4 % de vacíos con aire para producir la mezcla SMA, con el fin de proporcionar protección contra efectos de exudación después de la colocación y mejorar el desempeño frente a la formación de surcos especialmente en climas cálidos. Sin embargo, en climas fríos, se puede usar un contenido de vacíos cercano a 3.5 %.

La granulometría que mejor se ajuste a los criterios previamente mencionados con el porcentaje de asfalto preliminar, será la granulometría con la que se continuará el desarrollo del diseño.

c. Determinación del contenido del asfalto óptimo.

Considerando que La Guía Metodológica de la Napa, establece que se debe garantizar un contenido de asfalto mínimo de 6%, se recomienda trabajar con contenidos de asfalto cercanos al porcentaje mencionado para determinar el mejor comportamiento con los criterios de funcionalidad de la mezcla. De lo anterior, se define los contenidos de asfaltos: 5,7 %, 6,1% y 6,5%.

Sin embargo, La Guía Metodológica de la Napa recomienda para agregados con gravedad específica bulk mayor a 2.75, reducir levemente el contenido de asfalto en la mezcla. (NAPA, 2002).

Con los porcentajes de contenido de asfalto establecidos y la gradación previamente definida, se elaboran mezclas para ser compactadas a 100 giros en compactador Superpave y obtiene la gravedad específica bulk (G_{mb}) norma INV E – 733 - 13, la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}) norma INV E – 735 – 13 ver **Figura 29**, % de vacíos con aire ($\%Va$), VMA y VCA_{mix} .

Figura 29

Gravedad específica máxima teórica (G_{mm})



Nota: La figura a) muestra de mezcla asfáltica y b) extracción de vacíos en el proceso de ensayo de la prueba de la gravedad específica máxima teórica (G_{mm}), Fuente Elaboración propia.

Los valores obtenidos como % vacíos, VMA y de (VCA_{DRC}), se representan gráficamente de la siguiente forma:

Grafica 1: % asfaltos vs % vacíos

Grafica 2: % asfaltos vs VMA

Grafica 3: % asfaltos vs VCA DRC

De acuerdo con los datos obtenidos y las gráficas generadas de los mismos, se define el contenido de asfalto óptimo para el diseño. Este debe estar ligeramente por encima del 6,0% del peso de la mezcla y debe cumplir con la condición cercana de 4% de vacíos en la mezcla, $VCA < (VCA_{DRC})$, garantizando el contacto piedra a piedra en las mezclas SMA.

d. Evaluar susceptibilidad a la humedad y al escurrimiento del asfalto

Para evaluar la susceptibilidad a la humedad y al escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA, previamente se debe verificar que el contenido de fibra celulosa sea adecuado para garantizar la estabilidad de la mezcla a altas temperaturas, ya que inicialmente este se considera como una variable fija de 0,3 % en la mezcla.

Calibración del contenido de fibra celulosa.

Teniendo en cuenta los altos contenidos de asfalto de las mezclas SMA, la estabilidad del mismo se puede ver afectada cuando se conformen las muestras a evaluar. Por tal razón, se debe encontrar el porcentaje óptimo del aditivo fibra celulosa, el cual es un estabilizante que previene el escurrimiento del asfalto y lo distribuye de manera uniforme con el fin de conseguir la formación de una película gruesa y homogénea alrededor de los agregados gruesos.

Para garantizar que la mezcla no se va a escurrir en el tiempo ni con temperaturas más altas a las de ambiente, se procedió a realizar la prueba de escurrimiento bajo la siguiente norma de ensayo relacionada en la **Tabla 8**:

Tabla 8

Normas de ensayo para definir el contenido de fibra celulosa

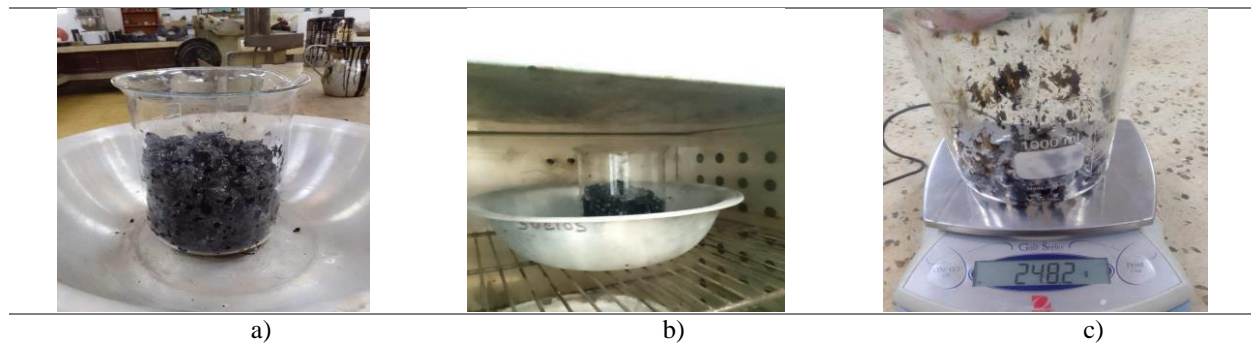
NOMBRE DE LA NORMA	NORMA
Determinación de las características de escurrimiento en mezclas asfálticas sin compactar	ASTM D 6390 - 05

Nota: en la tabla se presenta el documento base que especifica la determinación del contenido de fibra celulosa.

El proceso de calibración de la fibra, corresponde a la elaboración de cuatro (4) puntos de evaluación, donde se manejan diferentes porcentajes de fibra celulosa (0,3, 0,4, 0,6 y 0,7 %) y como se da a conocer en la **Figura 30**, a) en un beaker de laboratorio que contiene un (1) kilogramo de muestra de mezcla asfáltica tipo SMA, b) se ingresa la muestra al horno para ser sometida a 150 ° C, durante una (1) hora y c) se aprecia el beaker una vez la muestra es extraída después de salir del horno, donde se pesa el residuo adherido a las paredes con la ayuda de una pesa.

Figura 30

Proceso de determinar escurrimiento en mezclas asfálticas sin compactar.



Nota: La figura muestra el proceso de ensayo de la prueba de escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA-12,5. Fuente Elaboración Propia.

A continuación, se determinan los pesos de pérdida de material por escurrimiento y mediante el empleo de la ecuación Cálculo de Porcentaje de escurrimiento (6) (ASTM D 6390, 1997)

$$\mathbf{draindown} (\%) = \frac{(D-C)}{(B-A)} * \mathbf{100} \quad (6)$$

Donde:

A = Peso de la malla o recipiente.

B = Peso de recipiente + mezcla

C = masa de la placa o contenedor vacío

D = Peso de recipiente con asfalto adherido

Una vez obtenidos los resultados se selecciona el contenido de fibra celulosa que cumpla con la pérdida máxima establecida por la Guía metodológica NAPA, cuyo porcentaje de pérdida recomendado debe ser máximo 0,3% del peso total de la mezcla. (NAPA, 2002)

Evaluación de la Mezcla.

Una vez calibrados los elementos que componen la mezcla asfáltica SMA, es necesario evaluar el comportamiento de la misma, los cuales se basan principalmente en el desempeño de la mezcla en presencia de humedad y en presencia de altas temperaturas. Estas evaluaciones se encuentran especificadas en la **Tabla 9**

Tabla 9

Normas de ensayo para evaluar comportamiento de la mezcla.

PROPIEDAD	NOMBRE DE LA NORMA	NORMA
Susceptibilidad a la humedad	Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta.	E – 725 (Invias, 2013g)
Escurrimiento	Determinación de las características de escurrimiento en mezclas asfálticas sin compactar	ASTM D 6390 - 05

Nota: la tabla presenta los parámetros a evaluar en desempeño y a su vez para calibrar el contenido de fibra celulosa en la mezcla asfáltica SMA. Fuente: Elaboración Propia.

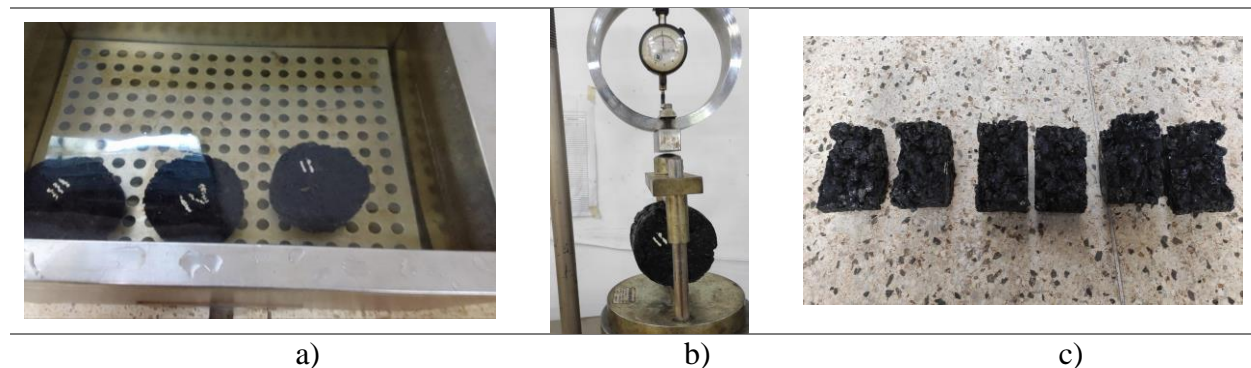
Susceptibilidad a la humedad:

Para evaluar la susceptibilidad a la humedad se realiza una comparación entre la resistencia a la tracción indirecta en condición seca y en condición humedad de la mezcla asfáltica. Durante el procedimiento se fabricaron 6 especímenes de mezcla asfáltica SMA 12,5 mm de acuerdo con la fórmula de diseño y empleando el molde de 4" de diámetro, que fueron compactados en el compactador Superpave con una energía de 75 giros para lograr un porcentaje de vacíos de $7\pm 1\%$.

En la **Figura 31** se observa el desarrollo de ensayo tracción indirecta, en la imagen a) proceso de inmersión de las muestras de mezcla asfáltica tipo SMA-12,5 durante 24 horas a 60° C, posterior, en la imagen b) se muestra la prueba de tracción indirecta a la mezcla en el equipo tipo prensa Marshall y finalmente en la imagen c) se aprecian las briquetas asfálticas falladas a la Tracción Indirecta, donde se observan las caras de rotura producto de la falla.

Figura 31

Prueba de susceptibilidad a la humedad en el laboratorio de la Universidad del Cauca.



Nota: La figura presenta el proceso de la prueba de susceptibilidad a la humedad, por medio de la norma de ensayo INV E-725. Fuente: Elaboración Propia.

De la evaluación en la prensa Marshall, se tiene la relación de la resistencia a tensión empleando la ecuación (7), que corresponde a la relación de la resistencia a la tensión.

$$RRT = \left(\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right) * 100 \quad (7)$$

Donde:

R_{RT} = Relación de resistencias a la tensión (%).

R_{TH} = Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua.

R_{TS} = Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua

Una vez obtenido el resultado RRT, se verifica el cumplimiento con la especificación que relaciona mínimo un 70% de relación RRT. (NAPA, 2002).

- **Susceptibilidad al Escorrimento**

El procedimiento empleado para evaluar la susceptibilidad al escurrimento en la mezcla asfáltica SMA hace parte del proceso de calibración del porcentaje de fibra celulosa de diseño, el cual se relacionó previamente en la calibración del contenido de fibra celulosa mediante la norma de ensayo (ASTM D 6390, 1997), donde se definió un contenido óptimo de la misma de 0,6% para la fórmula de diseño, garantizando el cumplimiento con la especificación de la guía de diseño NAPA que define una pérdida máxima de un 0,3% del peso total de la mezcla.

A continuación, en la **Tabla 10** se resumen los principales parámetros a cumplir una vez definido y chequeado el diseño de la mezcla SMA,

Tabla 10.

Parámetros de diseño SMA.

PROPIEDAD	REQUERIMIENTO
Porcentaje de Asfalto, %	6 mínimo
Vacíos con Aire, %	4
VMA, %	17 mínimo
VCA, %	Menor que VCAdrc
TSR, % (Tracción indirecta)	70 mínimo
Prueba de escurrimiento, %	0,30 máximo

Nota: La tabla muestra los datos de diseño de las mezclas SMA. Fuente: (NAPA, 2002).

3.3. Fase 2: Fabricación de probetas de las mezclas asfálticas y diseño experimental.

Se fabricaron doce (12) probetas tipo circular de mezcla asfáltica, seis (6) con mezcla tipo MDC-19 y seis (6) con mezcla tipo SMA-12,5, bajo la metodología de compactación SUPERPAVE. De acuerdo a los requerimientos de la norma de ensayo de la Rueda de Hamburgo, cada unidad experimental está compuesta de un par de probetas, de tal manera que por tipo de mezcla se obtuvieron tres (3) unidades experimentales.

El número de probetas a fabricar se definió con base en el histórico de investigaciones en las cuales se toman 3 muestras, en la mayoría de los casos, debido a la poca disponibilidad y el alto costo de operación de los equipos de prueba, como lo es el caso de esta profundización, donde se hicieron evaluaciones en Tomógrafo Rayos-X Medicinal en la Rueda de Hamburgo por cada unidad experimental.

3.3.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).

En la elaboración de las briquetas tipo MDC-19, se fijaron dos parámetros a cumplir en la evaluación de la mezcla asfáltica empleando la Rueda de Hamburgo de acuerdo a la norma AASHTO T-324-17:

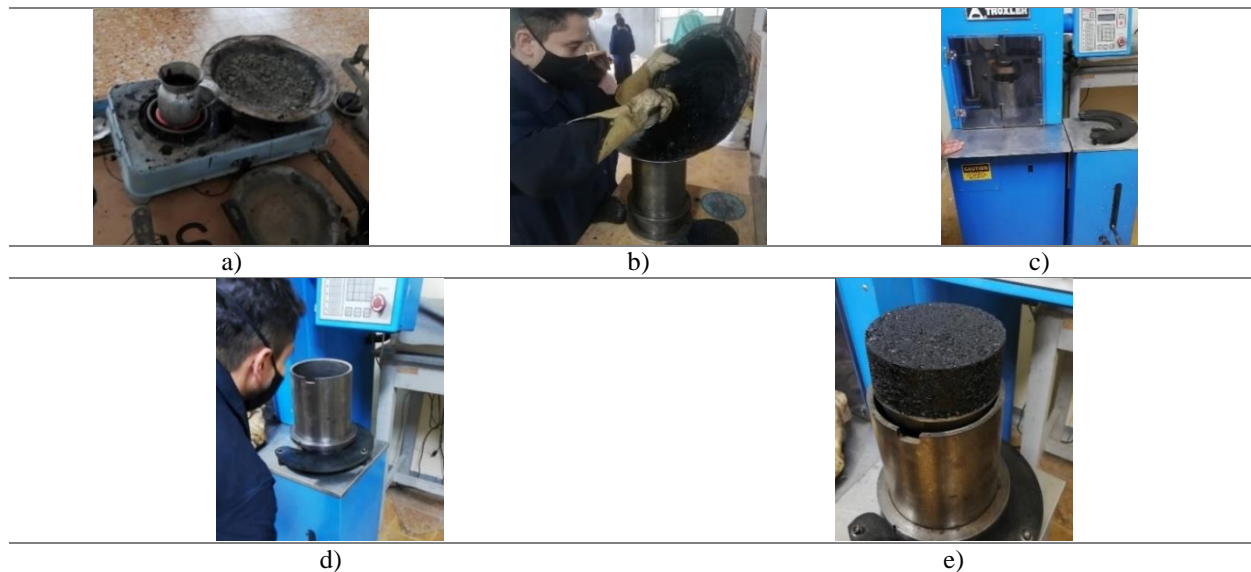
- La briqueta debe tener una altura de $60 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.
- La briqueta debe tener $7 \pm 1 \%$ de vacíos con aire.

Con el fin de llegar a estas condiciones se desarrolló un proceso de calibración mediante la fabricación de briquetas de prueba con diferentes pesos y diferentes energías de compactación en el compactador giratorio Superpave, a las cuales se les evaluaron los parámetros de control establecidos.

El proceso de fabricación de las briquetas se puede observar en **Figura 32**, donde la imagen a) presenta el calentamiento de los materiales para fabricar la mezcla asfáltica, en la imagen b) se muestra el proceso de vaciado en el molde de la mezcla asfáltica preparada, en la imagen c) el equipo de compactación Compactador Giratorio SUPERPAVE, en la imagen d) se observa el proceso de desmolde de la muestra después de compactada y finalmente en la imagen e) se observa el resultado de la muestra obtenida del compactador giratorio.

Figura 32

Fabricación de briquetas MDC-19 para Rueda de Hamburgo.



Nota: La figura presenta el proceso de fabricación de briquetas tipo MDC-19 en el laboratorio de la Universidad del Cauca. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenidos estos resultados, se tiene que la muestra cumple con los requerimientos para el ensayo de la Rueda de Hamburgo (% Vacíos con aire y altura) y se procede a fabricar 6 muestras con la fórmula de diseño y energía de compactación.

3.3.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)

En la elaboración de las briquetas tipo SMA-12,5 mm, se fijaron dos parámetros a cumplir para la evaluación en la Rueda de Hamburgo de acuerdo a la norma AASHTO T-324-17:

- La briqueta debe tener una altura de $60 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.
- La briqueta debe tener $7 \pm 1 \%$ de vacíos con aire.

Para fijar parámetros de comparación con las unidades experimentales de la mezcla tipo MDC-19, se calibró la altura y el % Vacíos a los respectivos promedios de las 6 muestras fabricadas tipo MDC-19.

El proceso de fabricación de la briquetas se puede observar en las **Figura 33**, donde la imagen a) representa el proceso de calentamiento de los moldes para la fabricación de las muestras, la imagen b) corresponde al proceso de vaciado en el molde de la mezcla asfáltica preparada, la imagen c) hace referencia a la toma de temperatura de la mezcla vaciada junto con el molde de compactación, en la imagen d) se tiene el proceso de compactación en el Compactador Giratorio SUPERPAVE y finalmente en la imagen e) se observa el resultado de la muestra obtenida del compactador giratorio.

Figura 33

Fabricación de briquetas SMA-12,5 para Rueda de Hamburgo.





d)



e)

Nota: La figura presenta el proceso de fabricación de briquetas tipo SMA-12,5 en el laboratorio de la Universidad del Cauca. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenidos estos resultados, se tiene que la muestra cumple con los requerimientos para el ensayo de la Rueda de Hamburgo (% Vacíos con aire y altura) y se procede a fabricar 6 muestras con la fórmula de diseño y energía de compactación.

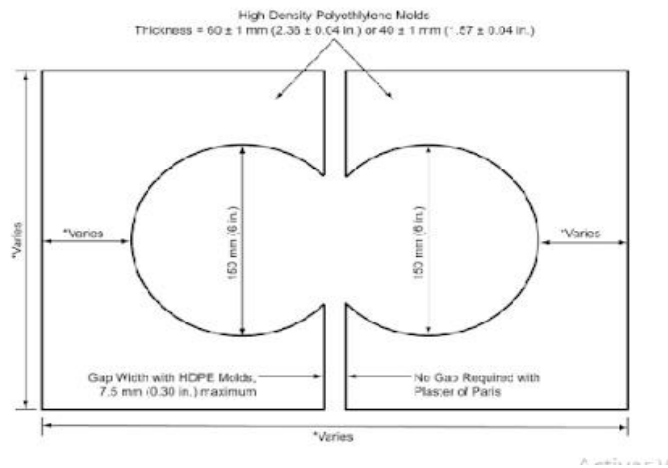
3.3.3. Preparación de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:

De acuerdo a los requerimientos de la norma de ensayo AASHTO T324, se procedió a realizar el corte de las briquetas para conformar las unidades experimentales a evaluar en el Tomógrafo y posteriormente en la Rueda de Hamburgo.

A continuación, en la **Figura 34** se muestra el esquema del molde en el que debe encajar la unidad experimental, compuesta por dos briquetas:

Figura 34

Molde para Rueda de Hamburgo.

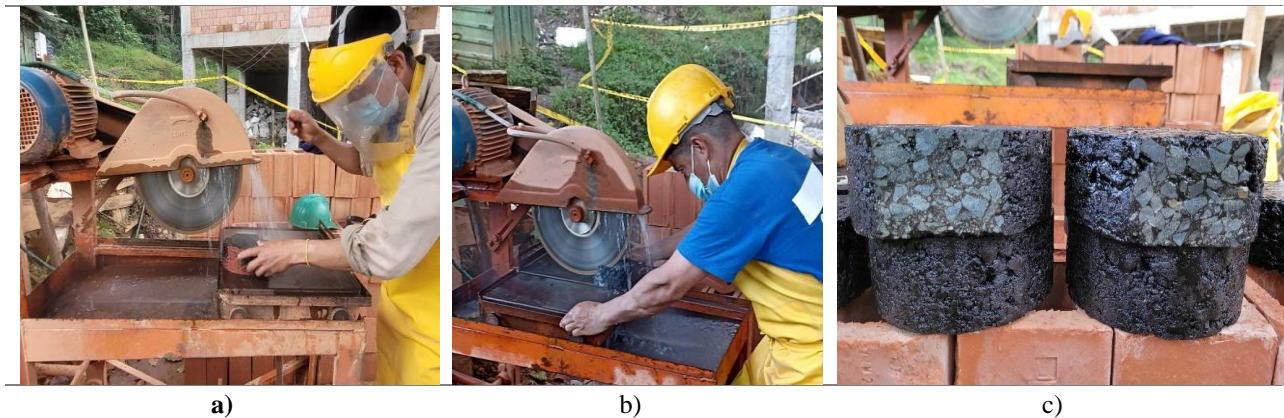


Nota: La figura representa el esquema con los detalles de corte para las unidades experimentales a evaluar en equipo Rueda de Hamburgo. Fuente: (AASHTO, 2017)

Las briquetas fueron cortadas transversalmente con ayuda de una maquina cortadora de banco como se observa en la **Figura 35**, facilitada por contratistas de la Universidad del Cauca y donde la imagen a) corresponde a la colocación de la briqueta para proceder a cortar a la medida especificada, en la imagen b) se muestra el corte realizado y en la figura y c) se aprecia la distribución de los agregados para cada tipo de mezcla, MDC-19 al costado izquierdo y SMA-12,5 costado derecho.

Figura 35

Proceso de corte de los especímenes.



Nota: La figura representa el proceso de corte de las muestras para cumplir con las dimensiones especificadas en el equipo Rueda de Hamburgo. Fuente: Elaboración Propia.

3.4. Fase 3: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas previa a ser sometidas a deformación permanente.

En el desarrollo de la presente fase, se analizaron las unidades experimentales por medio de la Tomografía Computarizada con Rayos X (equipo médico) y procesamiento de imágenes (software RadiAnt DICOM) con el fin de evaluar la estructura interna previa a la prueba de ahuellamiento en la Rueda de Hamburgo y con ello se obtuvo una base para comparar con los resultados de deformación después de falladas las muestras.

A continuación, se presenta la **Tabla 11** y **Figura 36** con las especificaciones técnicas del equipo de tomografía Rayos-X a utilizar:

Tabla 11

Especificaciones técnicas del Tomógrafo SIEMENS.

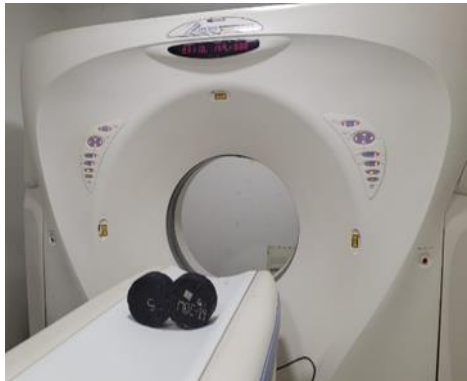
EQUIPO:	Tomógrafo 4 cortes.
MARCA:	SIEMENS
MODELO:	SOMATOM VOLUME
EMPRESA FABRICANTE:	Siemens Healtcara GmbH
PAÍS FABRICANTE:	Alemania
UBICACIÓN:	Clínica Teleimágenes Médicas Express SAS, Popayán
Intensidad de Rayo	120 kV
Corriente del Rayo	30 mA

Nota: La tabla muestra las características técnicas del equipo de tomografía

computarizada empleado en el estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 36

Tomógrafo Siemens Somatom Perspective.



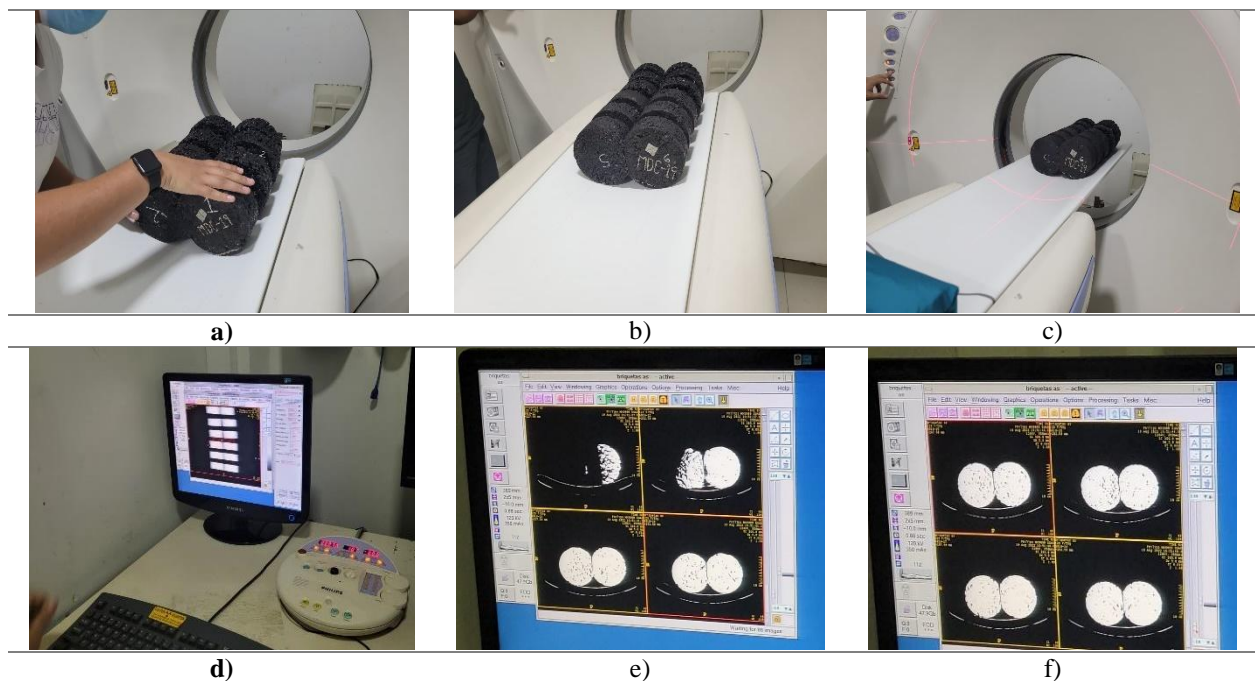
Nota: La figura representa el Tomógrafo de la Clínica Teleimágenes Médicas Express SAS, ubicada en la ciudad de Popayán. Fuente: Elaboración propia.

Para la toma de las imágenes fueron dispuestas las 6 unidades experimentales previamente definidas de acuerdo a su altura. En la **Figura 37** se observa el proceso de desarrollo de una sola toma en el equipo de tomografía donde se tiene que el orden de los 3 primeros especímenes corresponden a la mezcla tipo MDC 19 y los 3 últimos corresponden a la mezcla tipo SMA 12,5. En la imagen a) se muestra la colocación de las muestras en la mesa de

exploración, seguidamente en la imagen b) las muestras dispuestas conforme a las parejas asignadas, en la imagen c) la disposición de las muestras en el cabezal de escáner para iniciar con la toma de imágenes. En la imagen d) se aprecia el monitor donde se revelan los resultados de las imágenes, mostrando la vista en planta de las muestras, y finalmente en las imágenes e) y f) se genera la secuencia de cortes que se van haciendo por el equipo para generar las imágenes.

Figura 37

Proceso de tomografía Computarizada rayos X previo de la prueba de ahuellamiento.



Nota: La figura presenta el proceso de toma de imágenes con tomografía Computarizada rayos X en Clínica Teleimágenes Médicas Express SAS, Popayán. Fuente: Elaboración propia.

Para cada unidad experimental se obtuvieron imágenes, las cuales fueron analizadas empleando el software RadiAnt DICOM Viewer y de esta manera obtener los modelos 2D y 3D de la composición interna de las mezclas asfálticas.

El procesamiento de las imágenes se desarrolló mediante el análisis de Unidades Hounsfield (HU), que son las unidades de densidad con las que trabaja el Software RadiAnt DICOM Viewer, midiendo la densidad de cada píxel. Donde al aire se le asigna -1000 HU, al agua 0 HU y al hueso alrededor de 500 HU. El rango de unidades Hounsfield incluidas en un estudio se llama ventana. Lo explicado previamente, corresponde a la parte medicinal o del cuerpo humano, en el caso del presente estudio, que está analizando mezclas asfálticas, se tiene que la ventana de unidades Hounsfield (HU) va desde -1000, donde se tiene vacíos hasta 3095 donde tiene los agregados.

Mencionada la ventana de trabajo, se procedió a dividir en dos rangos de unidades Housfield los elementos de análisis, siendo el primer grupo materiales solidos compuesto por agregados, asfalto, filler y/o fibra celulosa y el segundo grupo corresponde a los vacíos de la mezcla asfáltica.

3.5. Fase 4: Ensayo de probetas en el equipo rueda de Hamburgo.

Una vez observada las unidades experimentales con el equipo de tomografía, se llevó a cabo el ensayo de la Rueda de Hamburgo, para evaluar la deformación permanente a las probetas de MDC y SMA; bajo los parámetros establecidos en la norma Standard Method of Test for

Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures T 324 (AASHTO, 2017) y que continuación se relacionan:

- Mezcla producida en laboratorio y compactada en espécimen cilíndrico.
- Temperatura de desarrollo del ensayo 50°C
- Límite del ensayo: El ensayo culmina cuando se genere 20000 pasadas o 10000 ciclos, o cuando la unidad experimental alcance 12,5 mm en la deformación de la huella.
- Vacíos con aire de las unidades experimentales están alrededor de $7 \pm 1\%$.

Para cada una de las mezclas asfálticas MDC y SMA, se tiene 6 especímenes respectivamente que agrupados en unidades experimentales se definen en 3 para cada tipo de mezcla, las cuales fueron formadas de acuerdo a la similitud en altura de cada briqueta.

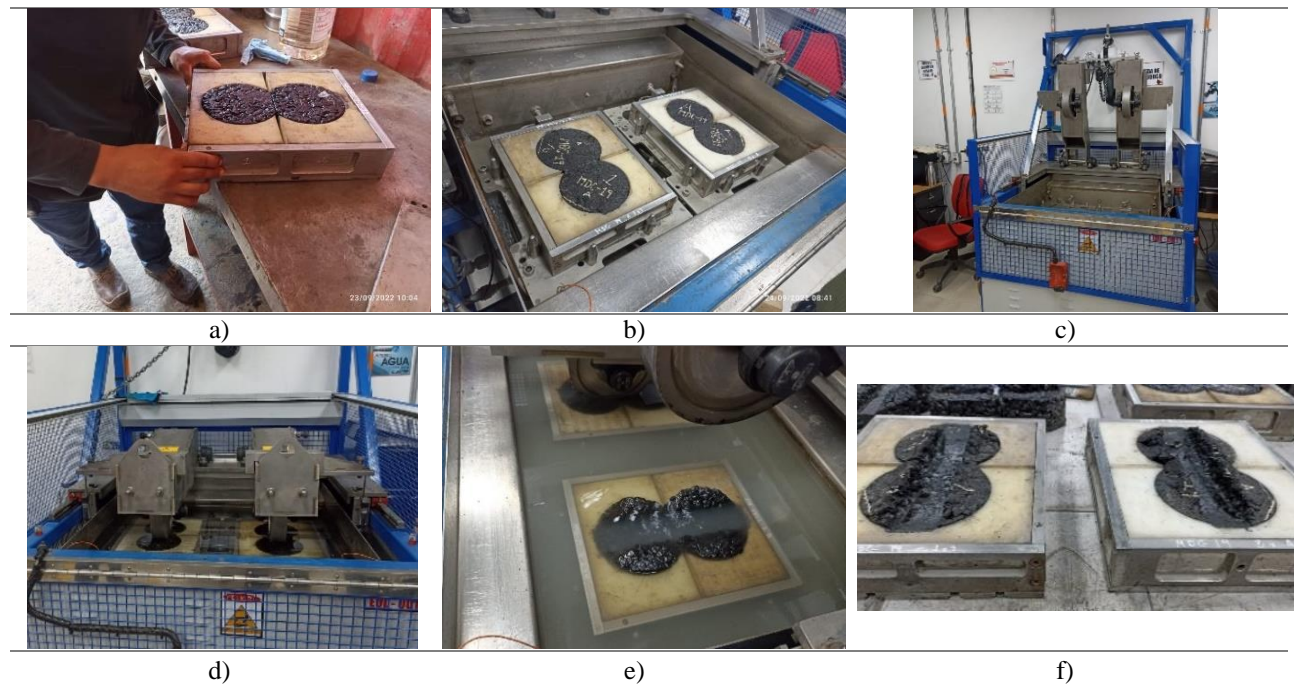
Posterior al ensamble de las muestras, se procede a someterlas en inmersión a temperatura controlada de 50 °C por 45 min para homogenizar las condiciones del ensayo y proceder a dar inicio al funcionamiento de la Rueda de Hamburgo. Cabe mencionar, que el equipo permite ensayar dos unidades experimentales al tiempo, lo que hace necesario que en el primer grupo se evalúen las unidades experimentales 1 y 2 de cada tipo de mezcla, dejando por último la prueba de la unidad experimental 3 respectivamente.

En la **Figura 38** se observa la imagen a) el ensamble de la muestra de mezcla asfáltica en el molde de ensayo, seguidamente en b) se muestra la disposición de los moldes en la máquina de Rueda de Hamburgo, en c) el equipo Rueda de Hamburgo, en d) la disposición de los brazos

de carga sobre las muestras para dar inicio al ensayo, en e) se muestra el proceso de descarga de los brazos del equipo una vez finaliza la prueba y finalmente en f) se observan las muestras asfálticas ahuelladas dentro de los moldes que fueron desmontados del equipo.

Figura 38

Montaje de muestras y ensayo de Rueda de Hamburgo.



Nota: La figura muestra el procedimiento de ensayo en el Equipo Rueda de Hamburgo, instalaciones Laboratorio Humberto Quintero. Fuente Elaboración Propia.

Una vez desarrollado el ensayo de deformación permanente en el equipo Rueda de Hamburgo, se obtiene la gráfica de deformación vs número de pasadas generada del software del equipo; donde se puede evaluar el comportamiento de las mezclas durante el periodo de la prueba. En la **Figura 39** (Flores et al., 2018) se muestra un esquema de los resultados de la prueba de rueda de Hamburgo, en la cual se puede observar los parámetros obtenidos:

-Zona de consolidación: Corresponde a las primeras pasadas de rueda de Hamburgo y la primera parte de la gráfica o al inicio de la deformación, que hace alusión al acomodo inicial de la mezcla al someterse a condiciones de carga, también denominada post compactación.

- Zona de deformación Plástica o zona creep: corresponde a la sección de la gráfica comprendida entre el límite de post compactación y antes del inicio del desgranamiento (si éste ocurre), y sirve para evaluar la acumulación de la deformación permanente debido al flujo plástico.

- Zona de desgranamiento: Corresponde a la última sección de la gráfica donde se genera un fuerte cambio de pendiente por culminación de deformación plástica. La pendiente de esta zona mide la acumulación de la deformación permanente debido al daño por humedad y el punto de inflexión del desgranamiento es la intersección de la pendiente de creep y la pendiente de desgranamiento, y corresponde al número de pasadas que una mezcla asfáltica puede soportar a una temperatura determinada antes de que el agregado y el asfalto comiencen a separarse.

Figura 39

Grafica deformación vs pasadas.



Nota: Esquema de los resultados de un ensayo en la rueda cargada de Hamburgo. Fuente: (Flores et al., 2018).

Este análisis permite evaluar el desempeño que presentó las mezclas MDC y SMA al someterse en la prueba Rueda de Hamburgo.

3.6. Fase 5: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas después de falladas en la rueda de Hamburgo.

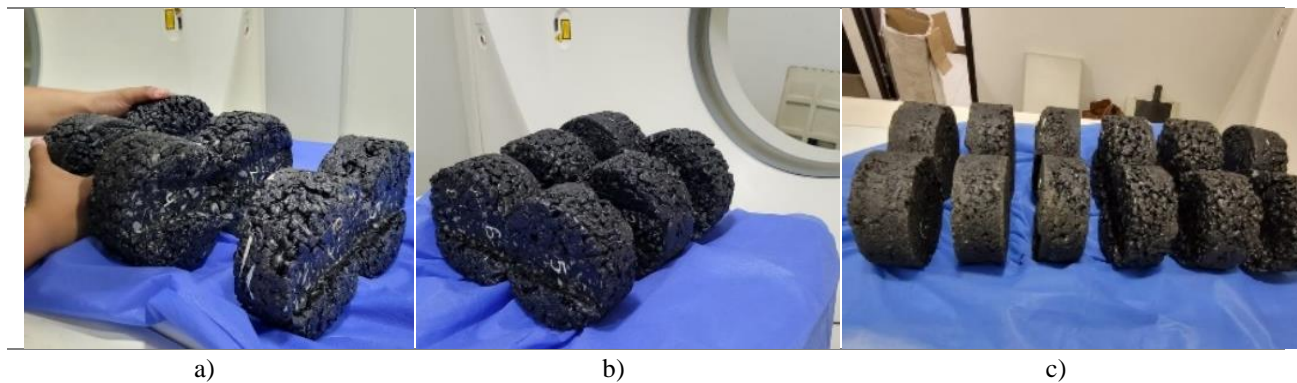
Una vez ahuelladas las probetas de mezcla asfáltica, nuevamente fueron analizadas por medio de la Tomografía Computarizada con Rayos X y procesamiento de imágenes en el software RadiAnt DICOM Viewer para evaluar la estructura interna, que permite observar y comparar la distribución final de los materiales presentes en cada una de las mezclas.

Para continuar con el orden establecido en el apartado 3.4 (Fase 3), la organización de las briquetas en el equipo del tomógrafo fue acorde al mismo empleado previo a la falla. Esto se generó con el fin de que se obtuviera el mismo punto de partida en el momento de análisis y comparación de las mismas.

En la **Figura 40** se puede observar en a) la colocación de las muestras en la mesa de exploración, seguidamente b) las muestras dispuestas conforme a las parejas asignadas y finalmente en c) la disposición de 3 muestras de mezcla asfáltica MDC-19 en el costado izquierdo y 3 muestras de SMA-12,5 en el costado derecho en posición para iniciar con la toma de imágenes.

Figura 40

Toma de imágenes con Tomografía Computarizada rayos X después de ahuellamiento.



Nota: La figura representa el proceso de disposición de muestras para toma de las imágenes con tomografía Computarizada rayos X en Clínica Teleimágenes Médicas Express SAS, Popayán. Fuente: Elaboración propia.

3.7. Fase 6: Resultados y análisis

Una vez desarrolladas cada una de las fases del presente trabajo, caracterización de materiales, diseño, ahuellamiento, análisis por tomografía computarizada con rayos X (medicinal) previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo, se procedió a analizar los datos obtenidos, así como las diferencias en la estructura interna de las mezclas y se concluyó sobre el comportamiento a la deformación permanente que presentaron las muestras.

Presentados los resultados obtenidos de cada proceso, se desarrolla el análisis comparativo al final de cada una de las fases para mejor claridad.

4. Resultado y Análisis

4.1. Fase 1: Caracterización de materiales y diseño de mezclas asfálticas MDC y SMA.

Los materiales empleados en la fabricación de mezclas asfálticas MDC y SMA, fueron caracterizados mediante ensayos de laboratorio desarrollados en en la Universidad del Cauca, Citec y Humberto Quintero, de los cuales a continuación se presentan los resultados obtenidos:

4.1.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC).

Para la caracterización de los materiales se consolidaron los siguientes resultados de caracterización de los agregados minerales y el asfalto, reportados por las plantas de producción Cachibí S.A y Humberto Quintero.

4.1.1.1. Caracterización de materiales

A continuación, en la **Tabla 12** se presentan los resultados de los ensayos desarrollados para los agregados minerales y en la **Tabla 13** los resultados de los ensayos de laboratorio efectuados al ligante asfáltico, donde se analiza el cumplimiento de las especificaciones requeridas para las mezclas asfálticas MDC 19:

a. Agregados minerales:

Tabla 12

Ensayos de caracterización de los agregados para mezcla MDC 19.

DUREZA, AGREGADO GRUESO			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 RODADURA	Resultado
Desgaste en Máquina de los Ángeles, máximo (%)	E - 218	25 máx	13,9
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E - 238	25 máx	11,9
DURABILIDAD			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E - 220	18	3,65
LIMPIEZA			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Índice de plasticidad, máximo (%)	E - 125 y 126	NP	NP
Equivalente de arena, mínimo (%)	E - 133	50	57
CUBRIMIENTO Y ADHERENCIA AGREGADO ASFALTO			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método <i>Riedel-weber</i>), índice mínimo	E - 774	4	10

Nota: La tabla presenta los resultados de dureza, durabilidad, limpieza, cubrimiento y adherencia. Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados presentados se puede observar que los agregados seleccionados para la granulometría de las mezclas asfálticas MDC-19, cumplen con los requerimientos de la especificación de Construcción de carreteras INVIAS en cuanto a la dureza al ser evaluados por abrasión e impacto, la durabilidad al ser sometidos a diferentes ciclos de inmersión en una

solución de sulfato de magnesio, la limpieza al tener unos contenidos de partículas nocivas por debajo de los límites requeridos y cubrimiento y adherencia al ser compatibles con el cemento asfáltico bajo condiciones de temperatura y humedad.

b. Cemento Asfáltico:

A continuación, son presentados en la **Tabla 13** los resultados de los ensayos de caracterización del ligante asfáltico suministrado por Humberto Quintero O. Y Cía S. C. A.

Tabla 13.

Ensayos de caracterización del ligante asfáltico

ASFALTO ORIGINAL				
Característica	Normas	Grado de Penetración 60-70		Resultado
		Mín.	Máx.	
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0,1 (mm)	E - 706	60	70	62,3
Punto de ablandamiento, (° C)	E - 712	48	54	48,3
Índice de penetración	E - 724	-1,2	0,6	-1,13
Viscosidad absoluta (60°C), (P)	E - 716 o 717	1500	-	2219
Ductilidad (25° C, 5cm/min), (cm)	E - 702	100	-	>100
Solubilidad en tricloroetileno, (%)	E - 713	99	-	99,99
Contenido de agua, (%)	E - 704	-	0,2	0
Punto de inflamación mediante copa abierta de Cleveland, (° C)	E - 709	230	-	289
Contenido de parafinas, (%)	E - 718	-	3	2,93
ASFALTO RESIDUAL				
Característica	Normas	Grado de penetración 60-70		Resultado
		Min	Max	
Pérdida de masa por calentamiento, (%)	E - 720	-	0,8	0,56
Penetración del residuo, en % de la penetración del asfalto original	E - 706	50	-	51
Incremento en el punto de ablandamiento, (°C)	E - 712	-	9	7,7
Índice de envejecimiento: relación de viscosidades (60 ° C) del asfalto residual y el	E - 716 o 717	-	4	3,84

Nota: La tabla presenta los resultados de las propiedades del asfalto a emplear en las mezclas MDC y SMA. Fuente: Elaboración Propia

De los resultados presentados se puede observar que el cemento asfáltico presenta valores que se encuentran dentro de los rangos establecidos en el Artículo 450 – 13 del capítulo 4 de las Especificaciones de Construcción de Carreteras (Invias, 2013a), tanto para el asfalto original como para el asfalto residual.

Teniendo en cuenta lo presentado en la **Tabla 12** y **Tabla 13** los materiales suministrados cumplen con los requisitos mínimos para la elaboración de mezclas asfálticas tipo MDC-19.

4.1.1.2. Chequeo de diseño:

Como se mencionó en el apartado de Metodología, para la mezcla asfáltica tipo MDC se trabajó con un diseño elaborado por Cachibí S.A, que corresponde a una mezcla densa en caliente MDC 19. A continuación, mediante la **Tabla 14** y **Figura 41**, se presenta la información de la gradación de los agregados y en la **Tabla 15**, se da a conocer la fórmula de diseño empleadas para la fabricación de las muestras.

Tabla 14.

Gradación de materiales para diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall

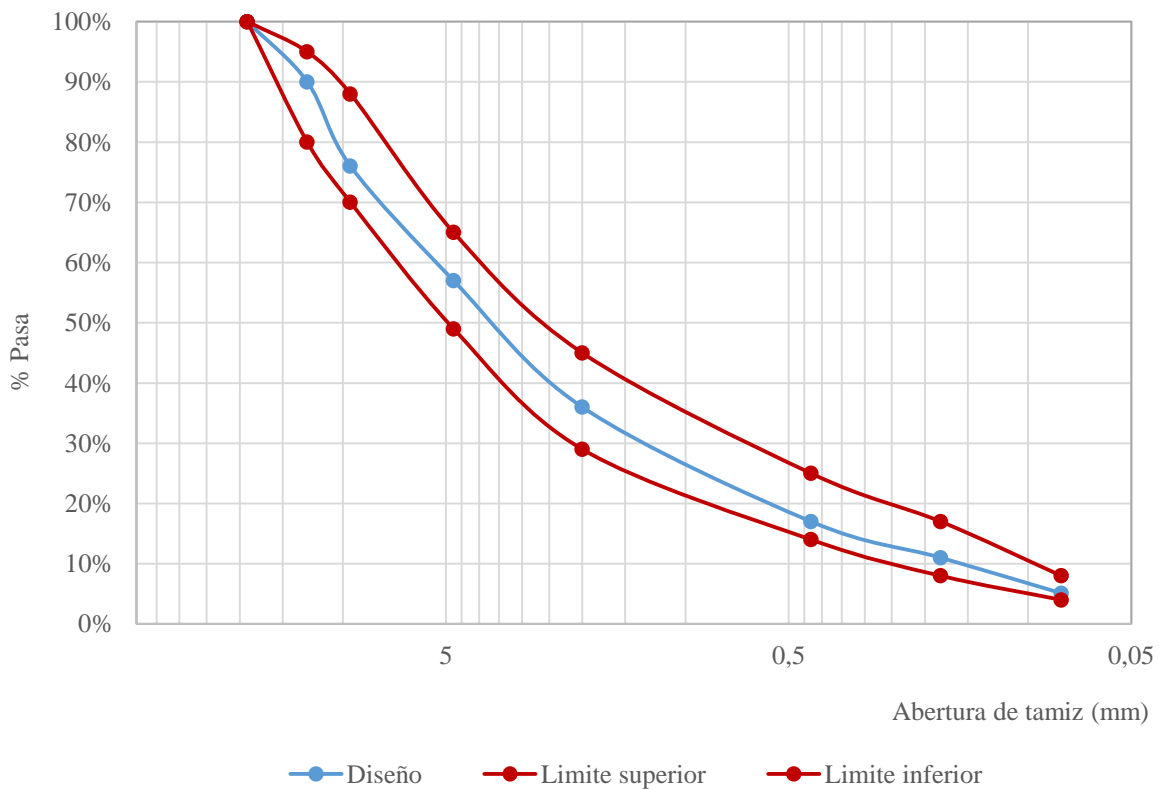
TAMIZ (mm)	NORMA		PESO RETENIDO	% RETENIDO	% PASA
	Límite Inferior	Limite Superior			
19	100	100	0	0	100

12,5	80	95	235	10	90
9,5	70	88	328,4	14	76
4,75	49	65	445,5	19	57
2	29	45	492,5	21	36
0,43	14	25	445,6	19	17
0,18	8	17	140,6	6	11
0,08	4	8	138,4	6	5,1
Fondo			119,6	5,1	0

Nota: En la tabla se presenta los límites superior e inferior que definen la franja y la curva granulométrica de la mezcla MDC 19 a fabricar. Fuente Elaboración propia.

Figura 41

Franja y la curva granulométrica de la mezcla MDC 19 a trabajar en el diseño.



Nota: En grafica se observa la franja y la curva granulométrica de la mezcla MDC 19 a fabricar. Fuente Elaboración propia.

Tabla 15.*Fórmula de trabajo*

% de Asfalto	% de asfalto efectivo	Peso específico del asfalto (g/cm ³)	Peso específico de los agregados (g/cm ³)	Temperatura de la mezcla (°C)	Temperatura de las briquetas (°C)	Gravedad máxima teórica	Gravedad Especifica Bulk
4,8	4,33	1,028	2,841	157	132	2,651	2,535
	Estabilidad (kg)	Flujo en (mm)	% Vacíos de la mezcla	% Vacíos agregado mineral	% Vacíos llenos agregado mineral	Relación llenante ligante	Relación estabilidad flujo
	1619	3,4	5	15	70	1,2	473

Nota: La tabla muestra los datos de diseño mezcla MDC -19. Fuente: Cachibí S.A.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las 4 briquetas tipo Marshall que fueron sometidas a las pruebas de estabilidad y flujo:

Tabla 16.*Resultados prueba Marshall en mezcla Asfáltica MDC – 19.*

Muestra		Briquetas tipo Marshall		
Característica	Norma	Chequeo		
		Resultado	% especificación	Resultado
Gravedad específica bulk	E - 733	2,534		
Estabilidad, (kg)	E - 748	1929	90% - 125%	119%
Flujo (mm)	E - 748	4	80% - 120%	118%

Nota: La tabla presenta los resultados promedio de las 4 briquetas correspondiente a los ensayos de Gravedad específica bulk, Estabilidad y Flujo.

De acuerdo al análisis de los resultados presentados en la **Tabla 16**, se concluye que los materiales suministrados junto con la granulometría del diseño de los cuatro (4) especímenes de

mezcla asfáltica tipo MDC-19 cumplen con la resistencia de diseño planteados para el diseño Marshall **Tabla 15**.

4.1.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA)

4.1.2.1. Caracterización de materiales:

Para la caracterización de los materiales se llevaron a cabo ensayos de calidad en los agregados minerales, de acuerdo a la disponibilidad de laboratorios de suelos Citec Ltda y de la Universidad del Cauca, de los cuales se muestran los resultados en las **tablas Tabla 17 y Tabla 18**. Para el asfalto y la fibra celulosa se consolidó la información suministrada por las plantas de producción de asfaltos Humberto Quintero y el proveedor de Fibra Celulosa Surfax en la **Tabla 13 y Tabla 19**.

a. Agregados minerales:

Tabla 17.

Ensayos en fracción gruesa para agregados de mezcla SMA -12,5.

DUREZA			
Característica	Normas	Valor norma NAPA NT 2 rodadura	Resultado
Desgaste en Máquina de los Ángeles, máximo (%)	E - 218	25 máx.	16,2
DURABILIDAD			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E - 220	18 máx.	4,2
CARAS FRACTURADAS			

Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Dos caras	E 227	60 mín.	100
ABSORCIÓN %			
Característica	Normas	Valor norma NT 2 rodadura	Resultado
Absorción %	E -223	2 máx.	1,45

Nota: La tabla presenta los resultados de dureza, durabilidad, caras fracturadas y absorción del agregado grueso de la mezcla SMA-12,5. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 18.

Ensayos en fracción fina para agregados de mezcla SMA -12,5.

CARACTERÍSTICA	NORMAS	VALOR NORMA NT 2 RODADURA	RESULTADO
Durabilidad			
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	E - 220	18 máx.	3,1
Angularidad			
Determinación del contenido de vacíos en agregados finos no compactados (influenciado por la forma de las partículas, la textura superficial y la granulometría) (%)	E - 239	45 mín.	49
Límites de Consistencia			
Limite liquido (%)	E - 125	25 máx.	22
Índice de plasticidad, máximo (%)			
Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	E - 126	NP	NP

Nota: La tabla presenta los resultados de durabilidad, angularidad y límites de consistencia del agregado fino de la mezcla SMA-12,5. Fuente: Elaboración Propia.

En los resultados presentados se puede evidenciar que los agregados seleccionados para la granulometría de las mezclas asfálticas SMA-12,5, cumplen con los requerimientos de la especificación de diseño NAPA, tanto en la fracción gruesa como en la fracción fina; indicando que el material proveniente de la planta de agregados Cachibí, cuenta con los parámetros de calidad necesarios para la fabricación de este tipo de mezclas asfálticas.

b. Aditivo:

Como se mencionó en el apartado 3. Metodología, referente a la fibra se celulosa, se presenta en la **Tabla 19**, las características principales de la fibra celulosa.

Tabla 19.

Aditivo adicionado a mezcla SMA

ADITIVO
Fibra Celulosa de marca Viatop Premium
Densidad bulk: 0,485 (g/cm ³)
contenido de fibra del 88,5%
Porcentaje pasa < 3,55 mm de 2,0%.

Nota: La tabla presenta las características relevantes de la fibra celulosa empleada en la mezcla SMA.

4.1.2.2. Diseño de mezcla SMA

Siguiendo el diagrama de flujo presentado en el apartado 3. Metodología, a continuación, se presenta el resultado del proceso de diseño de la mezcla SMA:

a. Selección De Agregados:

Teniendo en cuenta que el agregado mineral definido para la mezcla MDC 19 y analizado en el apartado 4.1.2.1 Caracterización de materiales:, cumple con las exigencias para las mezclas tipo SMA-12,5 se selecciona como agregado para conformar la gradación de diseño.

b. Determinar la gradación adecuada:

Para determinar la gradación adecuada para el diseño de la mezcla SMA 12,5, se seleccionaron tres gradaciones, nombradas: gradación 1 (G1); gradación 2 (G2) y gradación 3 (G3), que cumplen con la especificación de la banda granulométrica presentada en la NAPA de acuerdo con el tamaño máximo nominal del agregado 12,5 mm que se pueden observar en la

Tabla 20 y Figura 42.

Tabla 20.

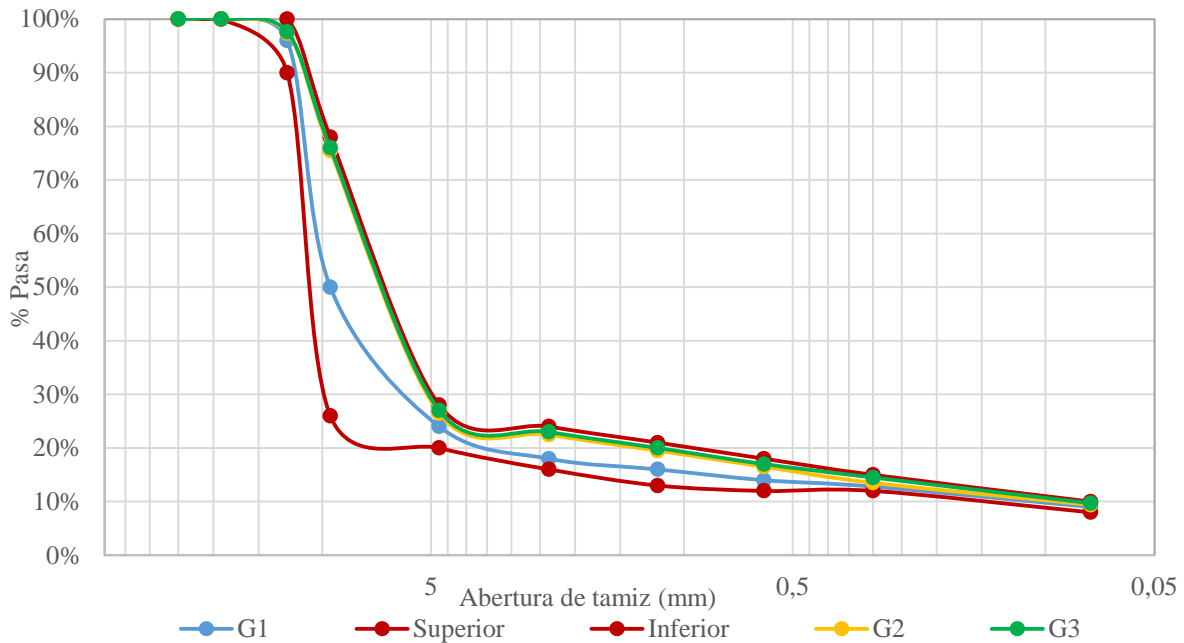
Bandas granulométricas de mezcla SMA 12,5 mm y gradaciones a trabajar en el diseño.

Tamaño del tamiz (mm)	Tamaño del tamiz (In)	ESPECIFICACIÓN SMA 12,5 (mm)		Gradación (G1)	Gradación (G2)	Gradación (G3)
		Inferior	Superior	% Pasa	% Pasa	% Pasa
25	1	100	100	100	100	100
19	3/4	100	100	100	100	100
12,5	1/2	90	100	96	97,40	97,60
9,5	3/8	26	78	50	75,50	76
4,75	N°4	20	28	24	26,50	27
2,36	N°8	16	24	18	22,5	23
1,18	N°16	13	21	16	19,5	20
0,6	N°30	12	18	14	16,5	17
0,3	N°50	12	15	12,8	13,5	14,5
0,075	N°200	8	10	9	9,4	9,7

Nota La tabla presenta las gradaciones G1, G2 y G3 seleccionadas para evaluar los criterios de diseño. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 42

Bandas granulométricas de mezcla SMA 12,5 mm y gradaciones a trabajar en el diseño.



Nota: La figura muestra la gráfica de la banda granulométrica especificada para la mezcla asfáltica SMA12,5 y las gradaciones de prueba G1, G2 y G3. Fuente: Elaboración Propia.

Determinación de vacíos (VCA), gravedad específica bulk seca y densidad bulk en la fracción del agregado grueso.

El material empleado para las gradaciones corresponde a uno solo y a su vez, estas son similares, por tanto, se determina (VCA_{DRC}) para una sola de las mezclas de agregados a trabajar, mediante la ecuación (1) como se muestra a continuación en la **Tabla 21** para la Gradación 1, (G1):

Tabla 21.

Determinación de vacíos (VCA).

ENSAYO	NORMAS	VARIABLE	RESULTADO.
Densidad relativa (Gravedad Especifica) y Absorción del agregado grueso	INV E 223 – 13	G_{CA}	2,882
Densidad bulk (Peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto	INV E 217 – 13	γ_S	1,727 kg/gm ³
Vacíos en la fracción gruesa del agregado		VCA_{DRC}	39,970 %

Nota: La tabla muestra el resultado de vacíos (VCA_{DRC}), gravedad especifica bulk seca y densidad bulk en la fracción del agregado grueso

El valor obtenido para el parámetro (VCA_{DRC}), que corresponde al proceso de varillado en seco manual de la fracción gruesa del material granular, hace referencia a los vacíos bajo una condición de compactación, que busca establecer la funcionalidad de contacto piedra a piedra que requiere la mezcla SMA y por tanto se convierte en un factor clave para el diseño de la misma.

Determinación de vacíos del agregado mineral (VMA) y % de vacíos de la mezcla asfáltica:

Los vacíos en el agregado mineral, hacen referencia a incluir todo en la mezcla asfáltica excepto el agregado grueso y fino, es decir lo que está ocupado por aire y contenido de asfalto efectivo. Por lo tanto, en la **Tabla 22**, se tienen los resultados de la elaboración de briquetas con diámetro de 150 mm y altura de 115 mm en compactador giratorio *Superpave* a 100 giros para las gradaciones G1, G2 y G3, asfalto 6,5% y fibra celulosa de 0,3 % con sus respectivos valores de VMA y % Va, empleando las ecuaciones (2) y (3).

Tabla 22.*Vacíos del agregado mineral (VMA) y % de Vacíos*

Ensayo	Normas o Ecuación	Variable	RESULTADOS		
		Contenido de Asfalto	6,5%	6,5%	6,5%
		Gradación	G1	G2	G3
		Fibra celulosa	0,3 %:	0,3 %:	0,3 %:
Gravedad específica bulk de total del agregado		Gsb	2.906	2.906	2.906
Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos	INV E 735 - 13	Gmm	2,572	2,565	2,562
Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos	INV E 733 - 13	Gmb	2,482	2,496	2,498
Porcentaje de agregado en la mezcla (%)		Ps	93,2	93,2	93,2
Vacíos del agregado mineral (%)	(2)	VMA	20.40 %	19.95 %	19.89 %
Porcentaje de vacíos con aire (%)	(3)	<i>Air Voids %</i>	3,49%	2,69%	2,50%

Nota: La tabla muestra los valores de los parámetros necesarios para determinar VMA y

% de Vacíos. Fuente: Elaboración propia

Es importante tener control del parámetro VMA, dado que la mezcla SMA presenta un alto contenido de asfalto, y, aun así, se espera que en ella se tenga vacíos con aire para garantizar el contacto piedra a piedra. En la búsqueda de cumplir con estas condiciones y con la práctica se ha definido que VMA debe ser mayor a 17% (NAPA, 2002), condición que se cumple en las tres mezclas relacionadas en la **Tabla 22**.

Determinación de vacíos en el agregado grueso de la mezcla (VCA_{MIX}).

El parámetro de vacíos en el agregado grueso de la mezcla hace referencia al volumen que ocupa el % vacíos con aire, contenido de asfalto efectivo y agregado fino, el cual se define mediante el empleo de la ecuación (4) y (5) y se relaciona en la **Tabla 23**.

Tabla 23.

Vacíos en el agregado grueso de la mezcla

Ensayo	Normas o Ecuación	Variable	RESULTADOS		
		Contenido de Asfalto	6,5%	6,5%	6,5%
		Gradación	G1	G2	G3
		Fibra celulosa	0,3 %:	0,3 %:	0,3 %:
Porcentaje de agregado en la mezcla (%)		Ps	93,2	93,2	93,2
Porcentaje de agregado por total de peso del agregado retenido en tamiz de rotura, expresado como un decimal (%)		PAbp	0,76	0,74	0,73
Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos	INV E 733 - 13	Gmb	2,482	2,496	2,498
Porcentaje de agregado por total de peso en la mezcla retenido en el tamiz de rotura (%)	(4)	Pbp	70,83	68,50	68,04
Vacíos en el agregado grueso de la mezcla (%)	(5)	VCA mix%	39,00%	40,68 %	41,03%

Nota: La tabla muestra los valores de los parámetros necesarios para determinar

(VCA_{MIX}). Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos los valores de (VCA_{DRC}), VMA y (VCA_{MIX}) en las mezclas SMA, relacionados mediante las tablas **Tabla 21**, **Tabla 22** y **Tabla 23**, y resumidos en la **Tabla 24** se evalúa los siguientes criterios:

1. $VMA > 17\%$ y $VCA < VCADRC$
2. Porcentaje de vacíos cercanos a 4%.

Tabla 24.

Resumen de valores de (VCA_{DRC}), (VCA_{MIX}) y VMA

Parámetro	Variable	RESULTADOS		
	Contenido de Asfalto	6,5%	6,5%	6,5%
	Gradación	G1	G2	G3
	Fibra celulosa	0,3 %:	0,3 %:	0,3 %:
Vacíos en la fracción del agregado grueso (%)	VCA_{DRC}	39,970 %	39,970 %	39,970 %
Vacíos del agregado mineral de la mezcla (%)	VMA	20.40	19.95	19.89
Vacíos del agregado grueso de la mezcla (%)	VCA_{MIX}	39,00%	40,68%	41,03%

Nota: Resumen de las tablas **Tabla 21**, **Tabla 22** y **Tabla 23**. Fuente: Elaboración

Propia.

Del resumen anterior se tiene que las tres mezclas cumplen con tener un valor de VMA superior a 17%. Las mezclas de gradación G2 y G3 con asfalto 6,5% respectivamente tienen valor de VCA_{mix} mayor que VCA_{drc} , haciendo que se pierda la característica principal de funcionamiento de la briqueta SMA que es el contacto piedra a piedra del agregado grueso. Por consiguiente, la mezcla que cumple con los criterios mencionados y con un valor cercano a 4% de vacíos con aire es la mezcla 1, que corresponde a gradación G1 con asfalto 6,5% y por tanto será la gradación de trabajo para el presente diseño de mezcla SMA 12,5.

c. Determinación del contenido del asfalto óptimo.

Definidos en el apartado de metodología los porcentajes de asfalto cercanos al 6%: 5,7 %, 6,1% y 6,5% y la gradación de diseño seleccionada, G1; se elaboran mezclas para ser compactadas a 100 giros en compactador Superpave obteniendo los parámetros que se presentan en la **Tabla 25**.

Tabla 25.

Valores obtenidos para la selección de contenido de asfalto SMA 12,5.

ENSAYO	NORMAS	Variable	RESULTADOS		
		Contenido de Asfalto	5,7%	6,1%	6,5%
		Gradación	G1	G1	G1
		Fibra celulosa	0,3 %:	0,3 %:	0,3 %:
Gravedad específica bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos	INV E 733 - 13	Gmb	2,456	2,476	2,482
Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos.	INV E 735 - 13	Gmm	2,576	2,574	2,572
Porcentaje de vacíos con aire (%)		% Va	4,67%	3,81%	3,49%
Ecuación 1. Vacíos en la fracción gruesa del agregado (%)		VMA	21.232%	20.591%	20.398%
Ecuación 3. Vacíos de la mezcla asfáltica (%)		VCA	39,64%	39,15%	39,00%
Vacíos en la fracción del agregado grueso (%)		VCA_{DRC}	39,970 %	39,970 %	39,970 %

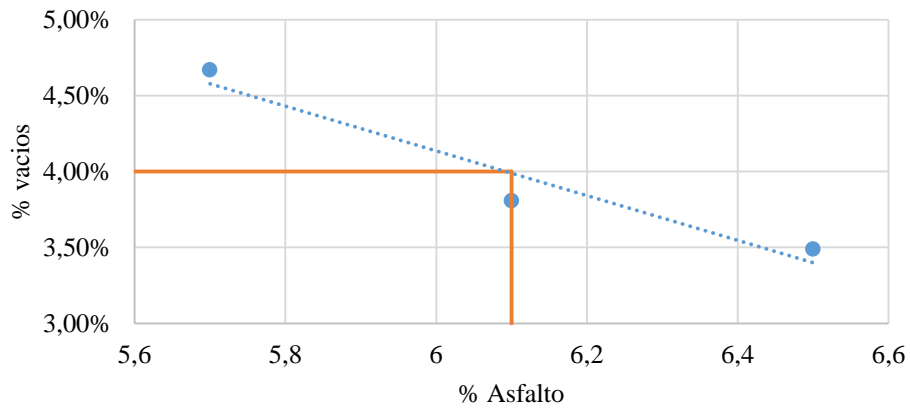
Nota: En la tabla se da a conocer los parámetros evaluados en la mezcla SMA 12,5 para definir el contenido de asfalto óptimo. Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, con los datos presentados en la **Tabla 25** se grafican los resultados obtenidos para cada uno de los % asfaltos analizados como se muestra en la **Figura 43** y de las mismas se define la fórmula de diseño, buscando que cumpla con:

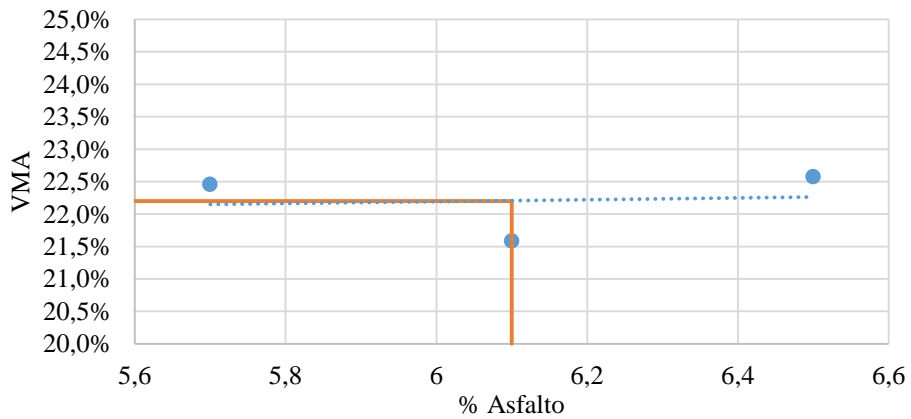
1. $VMA > 17\%$ y $VCA < VCADRC$
2. Porcentaje de vacíos cercanos a 4%.
3. Porcentaje de asfalto $> 6\%$

Figura 43

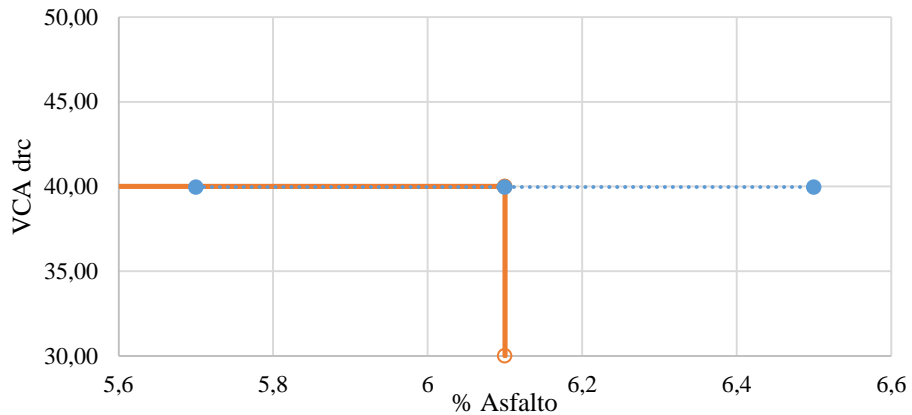
Gráficas de propiedades en función del contenido de asfalto.



a)



b)



c)

Nota: En la figura se presentan en a) la gráfica de % vacíos vs % asfalto, en b) la gráfica de VMA vs % asfalto y en c) la gráfica de VCA drc vs % asfalto para las 3 muestras evaluadas. Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a los datos obtenidos y las gráficas generadas de los mismos, se tiene que el contenido de asfalto óptimo para el diseño de la presente mezcla corresponde a 6,1 %, dado que esta condición se acerca a 4% de vacíos en la mezcla y se cumple $VCA < VCA_{drc}$, haciendo que se garantice el contacto piedra a piedra en las mezclas SMA.

Cabe mencionar que en este caso la guía Metodológica NAPA sugiere reducir levemente el contenido de asfalto en la mezcla, dado que se cuenta con material granular de trabajo de Gravedad específica bulk de 2.906. Por tanto, se evaluó un contenido de asfalto de 5.7 %, que generó como resultado un contenido de vacíos de 4,67% superior a 4% recomendado en el criterio de diseño, haciendo que este contenido no sea el más adecuado para trabajar en este caso.

d. Evaluar la susceptibilidad a la humedad y al escurrimiento del asfalto

Una vez definida la gradación de diseño y el contenido óptimo de asfalto, se presentan los resultados de la calibración del contenido de fibra celulosa para fijar los parámetros de diseño que permitieron continuar con la evaluación de la mezcla asfáltica.

- Calibración del contenido de fibra celulosa.

Los resultados de la evaluación de la mezcla asfáltica con los contenidos de fibra celulosa definidos en el apartado de Metodología se presentan en la **Tabla 26**, donde fue determinado el porcentaje de escurrimiento mediante la ecuación (6).

Tabla 26.

Evaluación del escurrimiento de la mezcla asfáltica SMA 12,5.

FIBRA %	0,3	0,4	0,6	0,7
A (Peso de la malla o recipiente) (g)	246,4	246,4	246,4	246,4
B (Peso de recipiente + mezcla) (g)	1304,78	1307,92	1313,21	1317,36
D (Peso de recipiente con asfalto adherido) (g)	253,5	252,4	249,4	248,2
Escurrecimiento %	0,671	0,565	0,281	0,168
Peso de la fibra (g)	3,205	4,278	6,431	7,511

Nota: La tabla muestra los datos de prueba escurrimiento en mezclas asfálticas sin

compactar. ASTM D 6390 – 05 para diferentes contenidos de fibra celulosa. Fuente

Elaboración Propia.

De acuerdo a lo evaluado en los resultados obtenidos y teniendo en cuenta que en la metodología de la Napa se indica que 0.3% es el porcentaje máximo de pérdida permitido por escurrimiento, se escoge un porcentaje de fibra celulosa de diseño del 0,6 %, que garantiza el límite de escurrimiento.

- **Evaluación de la Mezcla.**

A continuación, se presenta los ensayos de evaluación de la mezcla que corresponde a Susceptibilidad a la humedad y Escurrimiento:

Susceptibilidad a la humedad:

En la **Tabla 27**, se presenta la evaluación de la susceptibilidad a la humedad en la mezcla asfáltica mediante el desarrollo del ensayo INV E – 725.

Tabla 27.

Resultados ensayo de Tracción Indirecta INV E – 725 en mezclas SMA 12,5 mm.

Muestra	Estado seco			Estado húmedo		
	1	5	6	2	3	4
W _{sss} (g)	1186,3	1182,8	1188,6	1190,5	1189,4	1190,8
W _w (g)	698,5	691,8	701,2	699,4	700,5	702,3
W _{aire} (g)	1175,6	1179,4	1177,9	1180,3	1177,4	1178,5
Volumen (cm ³)	487,8	491	487,4	491,1	488,9	488,5
G _{mb}	2,410	2,402	2,417	2,403	2,408	2,412
G _{mm}	2,574	2,574	2,574	2,574	2,574	2,574
% Vacíos	6,384	6,693	6,123	6,641	6,451	6,287
Lectura de carga (N)	79	76	77	69	68	67
Constante del anillo	10,70	10,70	10,70	10,70	10,70	10,70
Lectura de carga corregida (N)	845	813	824	738	728	717
Altura (mm)	23,7	23,8	23,7	23,8	23,7	23,7
Radio (mm)	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Resistencia a la tensión en (kPa)	57000	54000	55000	49000	49000	48000
PROMEDIO		55333			48667	
Desviación Estándar σ		0,011			0,004	
Varianza σ^2		0,00011			0,000016	

Nota: La tabla muestra los valores de la evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas en la prueba de tracción indirecta. Fuente Elaboración Propia.

De los valores promedios obtenidos en la **Tabla 27** se obtiene la relación de la resistencia a la tensión empleando la ecuación (7) y su resultado se presenta en la **Tabla 28**.

Tabla 28.

Resultados de la relación de resistencia a la tensión en mezcla asfáltica SMA 12,5 (RRT).

CÁLCULO DE RELACIÓN RRT	
Resistencia seco (kPa)	55333
Resistencia húmedo (kPa)	48667
RRT (%)	87,95%

Nota: La tabla muestra la resistencia a la tensión en condición húmeda y seca para obtener RRT. Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la especificación para las mezclas tipo SMA requiere mínimo un 70% de relación RRT y de la **Tabla 28**, se obtiene 87,95 % en este parámetro, se concluye que la mezcla asfáltica SMA, tiene un potencial de daño por humedad aceptable, que cumple con la condición especificada

Susceptibilidad al Esguerramiento

De acuerdo a los resultados de la prueba de esguerramiento durante la calibración del porcentaje de fibra celulosa de diseño, el valor de contenido 0,6% de fibra celulosa seleccionado para fabricar las briquetas garantiza el cumplimiento con lo especificado en cuanto a la susceptibilidad al esguerramiento (ver **Tabla 26**).

4.1.3. Análisis de materiales y diseño para las mezclas asfálticas MDC 19 y SMA 12,5.

4.1.3.1. Caracterización de materiales en las mezclas MDC 19 y SMA 12,5.

Material granular y Granulometría:

El material granular que se empleó en la fabricación de las mezclas asfálticas proviene de una combinación de agregados de la Planta de Trituración de Cachibí SAS, el cual fue evaluado con las exigencias de dureza, durabilidad y limpieza tanto de las especificaciones INVIAS 2013 para la mezcla MDC-19 como de la Guía Metodológica de la NAPA para la mezcla SMA-12,5. Como resultado se obtuvo que las propiedades de origen y la combinación de materiales es adecuada para la fabricación de las muestras del presente trabajo de investigación respectivamente en cada mezcla asfáltica.

La evaluación de la dureza en los agregados es un parámetro clave para definir la viabilidad del uso de un material granular en el diseño de la mezcla asfáltica. En el caso de las mezclas MDC-19 y SMA-12,5 se empleó el ensayo de Desgaste de la Máquina de los Ángeles, el cual arrojó un valor de 13,9 % para la MDC-19 y de 16,2% para las SMA-12,5, valores que difieren dado que cada mezcla tiene su propia granulometría e influye la mineralogía de las partículas, las cuales participan en diferentes proporciones, cumpliendo con la exigencia de límite máximo 25%. Con el resultado de este parámetro se garantiza una mínima variación de sus

propiedades físicas tales como distribución de tamaño y estado de acomodo durante los procesos de compactación, tanto en laboratorio como in situ.

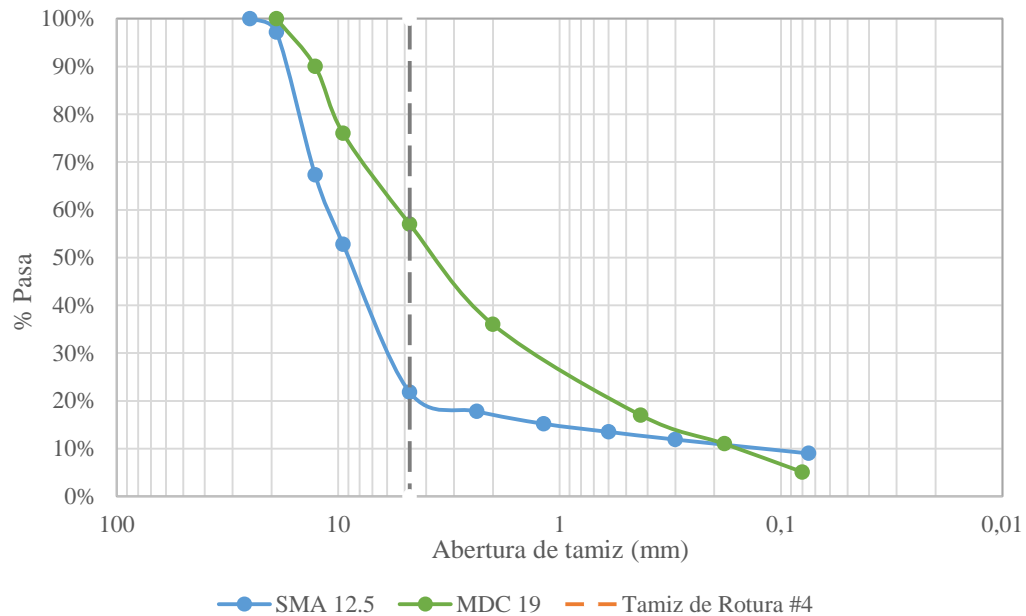
En cuanto a la geometría de las partículas del agregado empleado, se tiene un material con el 100% de caras fracturadas y sin presencia de partículas planas ni alargadas, así como se cuenta con valor de angularidad de 49%. Estos dos parámetros dan como resultado que el material a emplear garantiza la trabazón entre partículas, un buen acomodo durante la compactación y que aporta resistencia a la deformación y trabajabilidad para la mezcla asfáltica.

En las evaluaciones desarrolladas a la sección fina principalmente para definir su limpieza, se cuenta con materiales sin presencia de materia orgánica, libres de plasticidad y por tanto sus límites de Atterberg indican que no se tiene presencia de material expansivo. Adicional los valores obtenidos en los límites y equivalente de arena cumplen con lo establecido en las especificaciones de trabajo

Las granulometrías de las mezclas trabajadas difieren en las dimensiones de tamices que las conforman, presentando que las mezclas MDC-19 manejan una gradación continua, distribuida entre los tamices de ½” y Pasa 200 y por tanto su curva granulométrica no presenta cambios de pendiente fuertes. Caso contrario ocurre en las mezclas SMA-12,5, ya que requieren que alrededor del 80% de la granulometría tenga tamaños gruesos para garantizar el contacto piedra-piedra y, por lo tanto, la granulometría de las SMA-12,5 presentan un fuerte pendiente previo al tamiz de rotura #4 y para la fracción fina presenta una pendiente suave como se puede observar en la **Figura 44**.

Figura 44

Granulometrías MDC 19 vs SMA 12,5



Nota: En la gráfica se aprecia la diferencia que tienen las mezclas asfálticas MDC 19 y SMA 12,5 en su granulometría.

Ligante Asfáltico:

El cemento asfáltico junto con su caracterización empleado en el diseño de mezclas MDC-19 y SMA-12,5 corresponde a un asfalto 60-70 con un PG 64-22, el cual fue suministrado por la planta de asfaltos Humberto Quintero y hace parte de la fórmula de diseño de mezcla entregado por Cachibi SAS para la mezcla MDC-19. Cabe anotar que para las mezclas asfálticas tipo SMA la Napa recomienda dos grados PG adicionales al del diseño SUPERPAVE; sin embargo, para este estudio se fijaron los mismos materiales en la fabricación de las mezclas, con el fin de tener punto de comparación entre los desempeños de estas.

Aditivo estabilizador:

Como aditivo estabilizador se empleó solamente en la mezcla asfáltica SMA 12,5 la Fibra Celulosa de marca Viatop Premium, la cual fue calibrada para garantizar que en la mezcla no se genere escurrimiento.

4.1.3.2. Diseño de las mezclas MDC 19 y SMA 12,5.

MDC-19:

El diseño de la mezcla MDC-19 fue tomado de la información otorgada por la planta de agregados Cachibí SA en el año 2019. Posteriormente cuando fueron suministrados los materiales en el año 2020, se procedió a verificar la fórmula de diseño mediante la fabricación de muestras y evaluación de estabilidad y flujo, que cumplieran con los valores otorgados y con las especificaciones Invias.

SMA-12,5:

Durante el proceso de diseño de las mezclas tipo SMA-12,5 se identificaron diferentes factores importantes a tener en cuenta para lograr un óptimo funcionamiento de este tipo de mezclas. El criterio de selección de la gradación óptima del agregado mineral tiene diferentes connotaciones en los países donde se utilizan las mezclas tipo SMA, la Guía Metodológica de la NAPA, es una de las más reconocidas y prácticas, por lo que se puede adaptar fácilmente a las

necesidades de un proyecto en particular y por esa razón fue seleccionada para implementar en este estudio.

El trabajo con las gradaciones de agregado mineral con las que se desarrolló el proceso de selección de la granulometría de diseño se dificultó en gran medida por la alta sensibilidad en la variación de los porcentajes pasa en cada tamiz. La mezcla SMA seleccionada para trabajar corresponde a un tamaño máximo nominal de partícula de 12,5 mm y por tanto su tamiz de rotura es el # 4, el cual fue un punto clave para definir las tres curvas granulométricas presentadas en el apartado de diseño, dado que al generarse excesivo material que pasa por el tamiz de rotura, se reduce la fracción del agregado grueso y por tanto se pierde la característica de contacto piedra con piedra.

Cuando se definieron las tres granulometrías para mezclas SMA, se observa que la gradación 1, distribuye equitativamente el porcentaje pasa del tamiz # 4 entre los tamices menores para garantizar que la mezcla tenga tanto partículas que aporten al filler, así como partículas que ayuden a generar el acomodo o empaquetamiento entre las partículas gruesas. Cabe mencionar, que la Gradación 1 (G1) no se ciñe al límite superior de la norma como lo hacen las granulometrías G2 y G3. Esto refiere que cada material granular tiene su particularidad para funcionar en una mezcla asfáltica y el hecho de que la gradación 1 (G1) haya presentado un mejor comportamiento en la combinación no implica que siempre se deba manejar las mismas características de tamices para todas las mezclas. Todos los materiales son funcionales de acuerdo al servicio que prestarán, las condiciones del entorno y la combinación con otros materiales.

En la selección definitiva de la gradación de diseño se manejaron tres conceptos fundamentales para el adecuado funcionamiento de la mezcla SMA, como lo son Vacíos en la Fracción Gruesa del Agregado (VCA_{DRC}), que es el valor que se toma de base para garantizar el contacto piedra a piedra cuando se fabrique la mezcla asfáltica, los Vacíos en el Agregado Grueso de la Mezcla (VCA_{MIX}), que debe ser menor al VCA_{DRC} y finalmente los Vacíos del Agregado Mineral (VMA) que debe ser mayor a 17%. Estos tres criterios permiten evaluar las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica y su determinación provee que la proporción de los materiales a componer la mezcla funcionen acorde al principio de la mezcla SMA contacto piedra a piedra.

De las tres mezclas elaboradas con gradación G1, G2 y G3 para la selección de gradación, se obtuvo que las tres mezclas cumplen con tener un valor de VMA superior a 17%. Las mezclas de gradación G2 y G3 con asfalto 6,5% respectivamente tienen valor de VCA mayor que VCA_{DRC} , haciendo que se pierda la característica principal de funcionamiento de la briqueta SMA que es el contacto piedra a piedra del agregado grueso. Por consiguiente, la mezcla que cumple con los criterios mencionados previamente y que es cercana a 4% de vacíos de diseño es la mezcla 1, que corresponde a gradación G1 con asfalto 6,5% y por tanto será la gradación de trabajo para el diseño de mezcla SMA 12,5, sin olvidar que se debe ajustar el contenido de asfalto.

En la selección del contenido de ligante, se trabajaron 3 contenidos que corresponden a 6,5%, 6,1% y 5,7 %, teniendo en cuenta el criterio que las mezclas SMA deben tener un

contenido de asfalto mayor 6,0 % y que a su vez deben continuar aplicando los conceptos mencionados de VCA, VCA_{DRC} y VMA, se elaboraron las gráficas de % de vacíos vs % asfalto, VMA vs % asfalto y VCA_{DRC} vs % asfalto, observando que el contenido de ligante que cumple con todas las condiciones y garantiza una mezcla acorde en los parámetros fijados para diseño corresponde a 6,1 %.

Como se ha mencionado, la granulometría de la mezcla SMA al contener más del 80% en agregado grueso, tiende a disminuir el área superficial; a su vez, la capacidad de absorción del agregado influye notoriamente y por tanto el aditivo ayuda a que el asfalto que no alcance a ser absorbido por los agregados gruesos y el filler y que de alguna forma queda en los vacíos interarticulares sea atrapado por la fibra. Sin embargo, para que este aditivo funcione acorde a los materiales de asfalto y agregado seleccionados, se hace necesario calibrar la cantidad que se va emplear mediante el ensayo llamado “Escurrecimiento” especificado en la norma ASTM D 6390 – 05.

La metodología NAPA indica que su porcentaje mínimo de empleo en fibra celulosa debe ser de 0,3 % y partiendo de esta premisa se evaluaron un total de 4 puntos (0,3 – 0,4 – 0,6 – 0,7 %), a lo cual se seleccionó para la fórmula de diseño el porcentaje 0,6 %. En la calibración de Escurrecimiento se tiene que, a mayor contenido de fibra celulosa, aminora el valor de escurrecimiento del asfalto, es decir, mayor absorción del mismo por parte de la fibra celulosa.

Adicional, la fibra es un material liviano comparado con los otros componentes de la mezcla y su cantidad no es representativa, además está demostrado por la experiencia en campo que este aditivo no afecta las propiedades volumétricas de la mezcla.

Las mezclas asfálticas SMA al tener un material más grueso en su granulometría, tienen un comportamiento similar a las mezclas drenantes, por eso se debe evaluar la susceptibilidad a la humedad, por cuanto el agua tiende a albergarse en los vacíos que quedan en la mezcla compactada en sitio lo que genera problemas de adherencia y envejecimiento del asfalto. Cabe mencionar que en algunos países se evalúa la condición de congelamiento, para evaluar las mezclas ante los cambios volumétricos del agua en sus vacíos. Mediante el ensayo de tracción indirecta INV E-725 13 se evalúa la relación RTT para el ensayo y se obtuvo un valor 87,95 %, que implica que el potencial de daño por humedad es aceptable según la metodología NAPA que exige mínimo 70% para cumplir con este parámetro.

Una vez seleccionados los materiales y los porcentajes a emplear en el diseño definitivo de las mezclas SMA-12,5 y evaluando las pruebas de desempeño de Esguerramiento y Susceptibilidad a la Humedad, se tiene que la fórmula de trabajo lograda cumple con los parámetros necesarios para desempeñarse como una mezcla tipo SMA en el desarrollo del presente trabajo.

4.2. Fase 2: Fabricación de probetas de las mezclas asfálticas y diseño experimental.

El proceso de fabricación de las mezclas MDC y SMA, se basó en buscar el peso de material necesario para llegar a la altura de 60 mm y definir la energía de compactación necesaria para llegar a 7 ± 1 % de vacíos con aire de acuerdo a los parámetros que se deben cumplir en la evaluación de la mezcla asfáltica empleando la Rueda de Hamburgo.

4.2.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).

Para el caso de las mezclas asfálticas MDC 19, se seleccionaron dos pesos base que estuvieran dentro del rango normalmente utilizado en la práctica para las muestras a ensayar en la Rueda de Hamburgo y que permitan lograr la altura de 60 mm, los cuales se relacionan en la **Tabla 29**.

Tabla 29.

Resultados de compactación Superpave de la Mezcla MDC 19.

MUESTRA	PESO (g)	NÚMERO DE GIROS	ALTURA FINAL (mm)
1	2500	100	60,4
2	2600	120	63,6

Nota: La tabla muestra los resultados de alturas obtenidas. Fuente Elaboración Propia.

De la **Tabla 29**, se tiene que la altura de la Muestra No. 1 de 2500 g cumple con el requerimiento de la norma, por lo cual se procedió a desarrollar el análisis volumétrico para obtener el contenido de vacíos con aire que se muestra en la **Tabla 30**. Por otro lado, a la

muestra 2 se le proporcionaron 20 giros más, llegando a una altura final de 63,6 mm, con lo que se descarta la muestra de 2600 g de mezcla, dado que no cumple con la altura requerida.

Tabla 30.

Determinación de % de vacíos con aire de la muestra MDC 19 de 2500 g.

ENSAYO	NORMAS	RESULTADO
Gravedad específica teórica máxima (Rice)	INV E 735 - 13	2,662
Gravedad específica bulk (γ_s)	INV E 733 - 13	2,489
% Vacíos	INV E 736 - 13	6,499 %

Nota: La tabla muestra los resultados de Gravedad Máxima Teórica, Gravedad Específica

Bulk y % de Vacíos con Aire. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenidos estos resultados, se tiene que la muestra cumple con los requerimientos para el ensayo de la Rueda de Hamburgo (altura y % Vacíos con aire) y se procede a fabricar 6 muestras con el peso de 2500 g y energía de compactación de 100 giros, obteniendo los resultados presentados en la **Tabla 31:**

Tabla 31.

Briquetas MDC 19 para ensayar en Equipo Rueda de Hamburgo.

No Muestra	1	2	3	4	5	6
Gmm	2,662	2,662	2,662	2,662	2,662	2,662
Gmb	2,495	2,497	2,499	2,497	2,499	2,498
% Vacios	6,273 %	6,198%	6,123%	6,198%	6,122%	6,161%
Promedio	6,18 %					
Desviación Estándar (σ)	0,00057					
Varianza (σ^2)	0,0000032					
Altura (mm)	61,38	61,43	59,78	60,43	61,5	62,35
Promedio	61,15					
Desviación Estándar σ	0,904					

Varianza (σ^2)	0,818
---	-------

Nota: En la tabla se presentan los valores obtenidos para cada una de las muestras fabricadas, los valores promedio de altura y % de vacíos con aire. Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)

Con el fin de llegar a las condiciones promedio establecidas para la MDC 19, que corresponden a altura de 61,15 mm y % de vacíos con aire de 6,180 %, se inició el proceso de calibración en peso y energía de compactación denominado Calibración 1.

Para tener el peso de calibración 1, se emplearon las propiedades volumétricas determinadas en la etapa de diseño de la mezcla asfáltica SMA 12,5, con las cuales se llegaba a un % vacío cercano a 4% con energía de compactación de 100 giros, lo que dio partida para definir el peso y energía de compactación que se relaciona en la **Tabla 32**.

Tabla 32.

Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 1.

MUESTRA	PESO (g)	NÚMERO DE GIROS	ALTURA FINAL (mm)
1	2690,25	75	66,00

Nota: La tabla muestra los resultados de altura obtenida. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, con el peso y la energía de compactación seleccionadas, no se logró cumplir con el parámetro de calibración correspondiente a altura. Sin

embargo, se evaluó las propiedades volumétricas con el fin de indagar la condición de vacíos en la calibración 1, estos datos se presentan en la **Tabla 33**.

Tabla 33.

Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración 1.

ENSAYO	NORMAS	RESULTADO
Gravedad específica teórica máxima (Rice)	INV E 735 - 13	2,574
Gravedad específica bulk (γ_s)	INV E 733 - 13	2,399
% Vacíos	INV E 736 - 13	6,827%

Nota: La tabla muestra los resultados de Gravedad Máxima Teórica, Gravedad Específica Bulk y % de Vacíos con Aire. Fuente: Elaboración Propia.

De la **Tabla 33**, se tiene que el % de vacíos 6,827, cumple con el parámetro definido de 7 ± 1 % de vacíos; sin embargo, se debe seguir el proceso de calibración para lograr la altura de 61 ± 1 mm, lo que lleva a la Calibración 2 en la **Tabla 34**.

Tabla 34.

Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 2.

MUESTRA	PESO (g)	NÚMERO DE GIROS	ALTURA FINAL (mm)
2	2491,96	75	6,3

Nota: La tabla muestra los resultados de altura obtenida. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, con el peso y la energía de compactación seleccionadas, no se logró cumplir con el parámetro de calibración correspondiente a altura. Sin embargo, se evaluó las propiedades volumétricas con el fin de indagar la condición de vacíos en la calibración 2, estos datos se presentan en la **Tabla 35**.

Tabla 35.

Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración 2.

ENSAYO	NORMAS	RESULTADO
Gravedad específica teórica máxima (Rice)	INV E 735 - 13	2,574
Gravedad específica bulk (γ_s)	INV E 733 - 13	2,398
% Vacíos	INV E 736 - 13	6,838 %

Nota: La tabla muestra los resultados de Gravedad Máxima Teórica, Gravedad Específica

Bulk y % de Vacíos con Aire. Fuente: Elaboración Propia.

Comparadas la calibración 1 y 2, se tiene que, al disminuir peso de la briqueta, se disminuye altura de la misma y a su vez, la variación en % vació es mínima, lo que lleva a que se continúe con la calibración ajustando peso y energía de compactación para disminuir tanto altura como vacíos, es decir, se genera una calibración 3, que se presenta en la **Tabla 36**.

Tabla 36.

Resultados de compactación Superpave de la SMA 12,5 mm, calibración 3.

MUESTRA	PESO (g)	NÚMERO DE GIROS	ALTURA FINAL (mm)
2	2483,39	100	61,1

Nota: La tabla muestra los resultados de altura obtenida. Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede observar en la tabla anterior, con el peso y la energía de compactación seleccionadas, se logró cumplir con el parámetro de calibración correspondiente a altura, por tanto, se evaluó las propiedades volumétricas con el fin de indagar la condición de vacíos en la calibración 3, estos datos se presentan en la **Tabla 37**.

Tabla 37.*Determinación de % de vacíos con aire de la muestra SMA 12,5, Calibración 3.*

ENSAYO	NORMAS	RESULTADO
Gravedad específica teórica máxima (Rice)	INV E 735 - 13	2,574
Gravedad específica bulk (γ_s)	INV E 733 - 13	2,421
% Vacíos	INV E 736 - 13	5,961 %

Nota: La tabla muestra los resultados de Gravedad Máxima Teórica, Gravedad Específica

Bulk y % de Vacíos con Aire. Fuente: Elaboración Propia.

Una vez obtenidos estos resultados de la muestra Calibración 3, se cumple con los requerimientos para el ensayo de la Rueda de Hamburgo y se procede a fabricar 6 muestras con, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 38.*Briquetas SMA 12,5 para ensayar en Equipo Rueda de Hamburgo.*

No. de Muestra	1	2	3	4	5	6
Gmb	2,421	2,416	2,417	2,419	2,417	2,419
Gmm	2,574	2,574	2,574	2,574	2,574	2,574
% Vacíos	5,961	6,138	6,112	6,044	6,106	6,015
Promedio	6,063					
Desviación Estándar σ	0,00068					
Varianza σ^2	0,00000046					
Altura (mm)	61,1	61,7	61,7	61,8	62,0	62,0
Promedio	61,66					
Desviación Estándar σ	0,336					
Varianza σ^2	0,113					

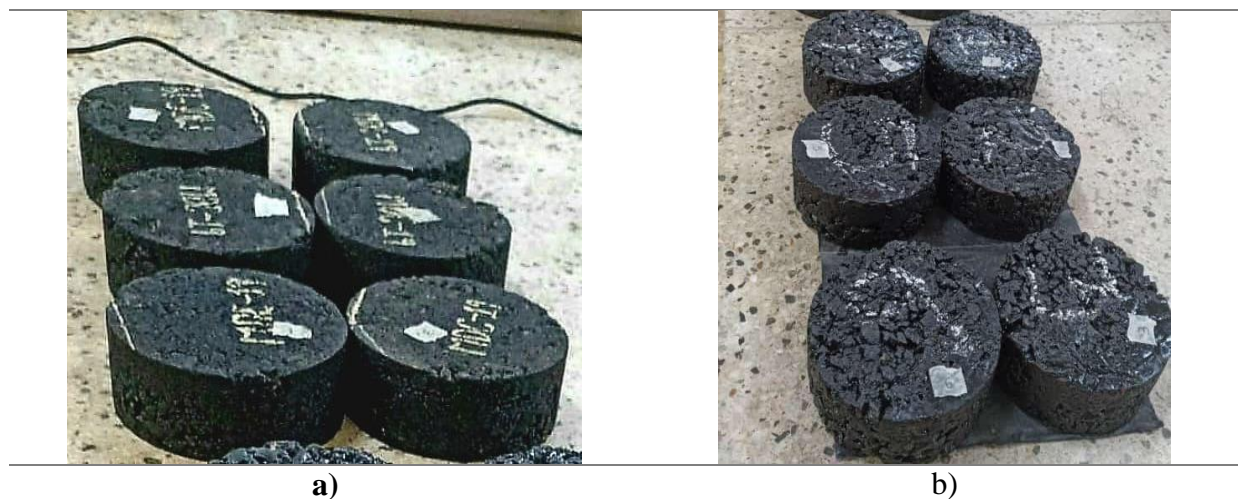
Nota: En la tabla se presentan los valores obtenidos para cada una de las muestras

fabricadas, los valores promedio de altura y % de vacíos con aire. Fuente: Elaboración Propia.

De las tablas **Tabla 31** y **Tabla 38**, se tiene doce (12) probetas tipo circular de mezcla asfáltica, seis (6) con mezcla tipo MDC-19 y seis (6) con mezcla tipo SMA-12,5, de acuerdo a los requerimientos de la norma de ensayo de la Rueda de Hamburgo, las cuales se muestran en la **Figura 45**.

Figura 45

Probetas MDC 19 y SMA 12,5.



Nota: La tabla muestra a) briquetas de MDC 19 y b) briquetas de SMA 12,5.

4.2.3. Preparación de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:

Para cada tipo de mezcla se tienen 6 especímenes que fueron cortados y agrupados en parejas para conformar las unidades experimentales, de acuerdo a las alturas de las mismas, tal como se muestra a continuación:

Tabla 39.*Conformación de unidades experimentales MDC 19 y SMA 12,5.*

MDC 19		
UNIDAD EXPERIMENTAL	MUESTRA	ALTURA (mm)
1	1	61,38
	2	61,43
2	3	59,78
	4	60,43
3	5	61,50
	6	62,35
SMA-12,5		
1	1	61,10
	3	61,70
2	2	61,70
	4	61,80
3	5	62,00
	6	62,00

Nota: En la tabla se muestra las parejas de especímenes para conformación de unidades experimentales. Fuente: Elaboración Propia.

4.2.4. Análisis de los especímenes de ensayo en la Rueda de Hamburgo:

El proceso de compactación de las briquetas en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos de la Universidad del Cauca, donde se cuenta con un equipo de compactación giratorio SUPERPAVE, el cual para definir la energía de compactación requiere que sea indicado el número de giros para compactar la mezcla. Al tener la limitante de solo poder fijar la variable de número de giros, fue necesario desarrollar un proceso de calibración para definir la cantidad de material necesario a cumplir con la altura y el % de vacíos especificados en la norma AASHTO T-324-17.

Se observó que, los pesos requeridos para llegar a las mismas condiciones de altura y % de vacíos variaron entre los dos tipos de mezcla asfáltica, obteniéndose que para las mezclas tipo

MDC-19 se requirió mayor cantidad de material que para las mezclas tipo SMA-12,5. Esto se debe a las diferencias en la composición granulométrica de cada una, dado que las mezclas MDC-19 tienen una granulometría continua, mientras que para las SMA-12,5 se tiene una mayor proporción de gradación gruesa y una discontinuidad en los tamices intermedios, requiriéndose mayor cantidad de asfalto para conseguir el mismo volumen y condiciones de vacíos, generándose una mezcla más liviana por la baja densidad del cemento asfáltico.

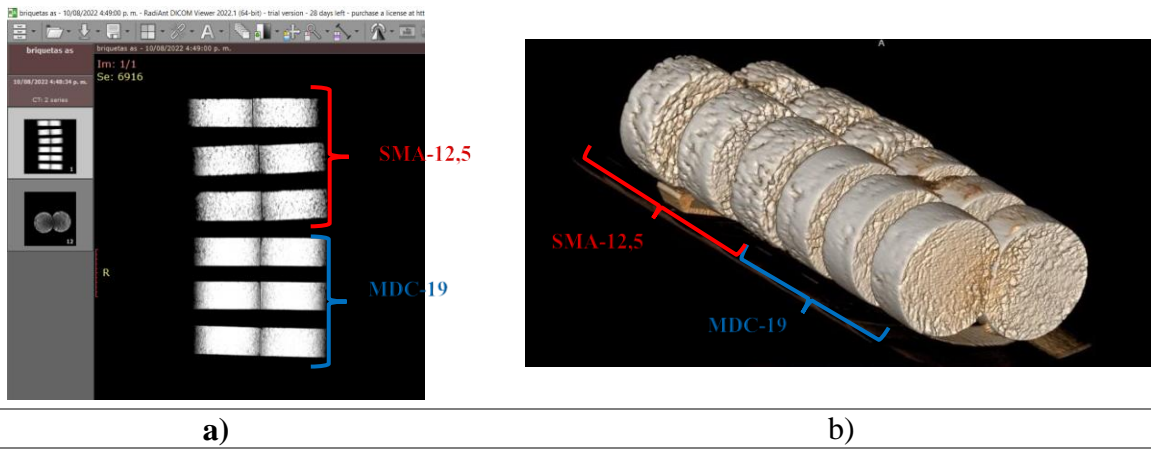
4.3. Fase 3: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas antes de ser sometidas a deformación permanente.

A continuación, se muestran los resultados de procesamiento de imágenes para cada una de las unidades experimentales, donde se presentan los modelos en 2D y 3D para el análisis de la composición de la estructura interna de las mezclas asfálticas antes de la prueba de ahuellamiento en la Rueda de Hamburgo.

El equipo de tomografía empleado generó por cada unidad experimental alrededor 14 imágenes o cortes en la sección transversal. Es decir, el espesor de la unidad experimental que corresponde a 60 mm fue fraccionado cada 4,28 mm aproximadamente y con ayuda del software RadiAnt DICOM Viewer se procesaron las imágenes para obtener los modelos 2D y 3D de las unidades experimentales. A continuación, en la **Figura 46** se dan a conocer las imágenes y el orden de análisis en el equipo.

Figura 46

Vista en planta y en 3D de las 6 muestras antes de someterse a falla por ahuellamiento.



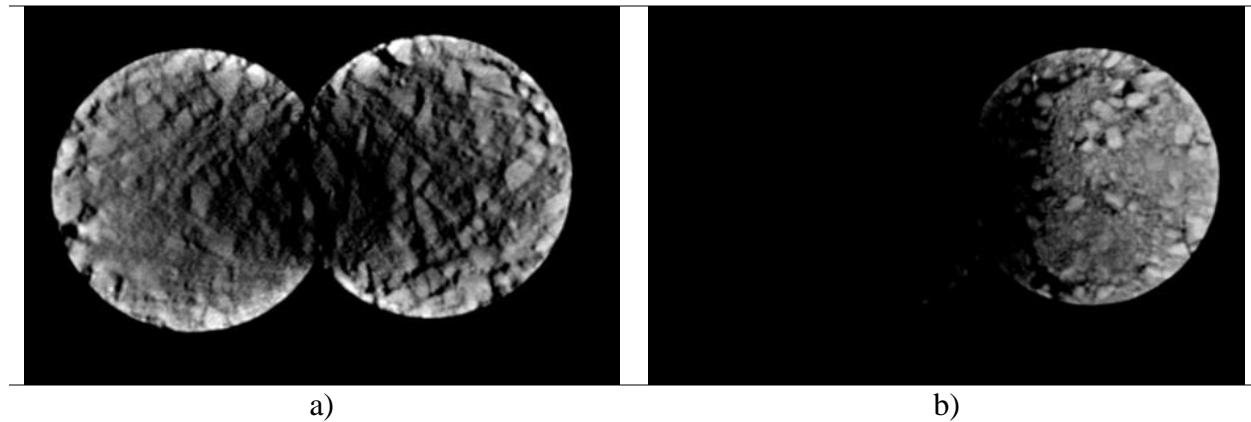
Nota: La figura representa en a) la planta en 2D de las parejas de briquetas, las 3 muestras tipo MDC-19 en la parte de abajo y la 3 tipo SMA-12,5 en la parte de superior. En b) se aprecia el modelo 3D de las 3 muestras tipo MDC-19 en la parte de adelante y las tres muestras tipo SMA-12,5, en la parte de atrás. Fuente: Elaboración propia.

En el desarrollo de la fase de tomografía, se obtuvo que todas las muestras generaron un ruido o distorsión en la parte central de las unidades experimentales como se observa en a), **Figura 47**, la cual se atribuye al pequeño espacio que se presenta entre la unión de las briquetas cortadas que conforman la unidad experimental.

Adicional, en el empleo del tomógrafo se presentó dificultad en la alineación de las briquetas respecto al eje de lectura del equipo y por tanto en varias imágenes se aprecia cortes con caras transversales incompletas como se observa en b) **Figura 47**.

Figura 47

Apreciaciones generales del proceso de tomografía

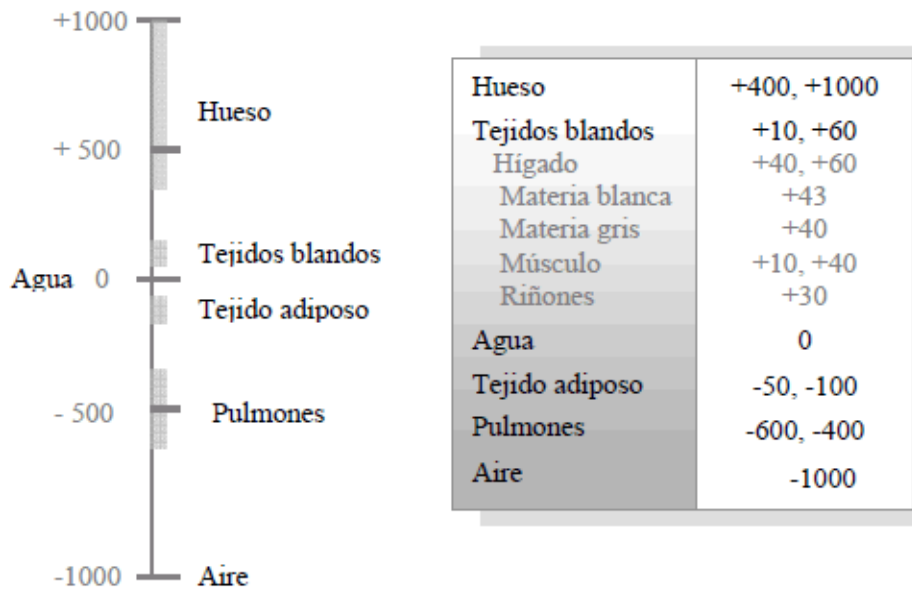


Nota: a) corresponde a la distorsión que se presenta en el centro de la muestra, b) cara parcial de una muestra generada por la dificultad para alinear las muestras con el eje de lectura.

El proceso de tomografía computarizada con rayos X, corresponde a la interacción de los rayos X con el objeto a analizar, el cual se representa en píxeles que conforman la imagen obtenida. La densidad de cada píxel se mide en unidades Hounsfield (HU), donde al aire se le asigna -1000 HU, al agua 0 HU y al hueso alrededor de 500 HU como se observa en la **Figura 48**. El rango de unidades Hounsfield incluidas en un estudio se llama ventana. Lo explicado previamente, se aplica en el campo de la medicina o del cuerpo humano; en el caso del presente estudio, que está analizando mezclas asfálticas, se tiene que la ventana de unidades Hounsfield (HU) va desde -1000, donde se tiene vacíos; hasta 3095 donde tiene los agregados.

Figura 48

Unidades Hounsfield (HU) Cuerpo Humano



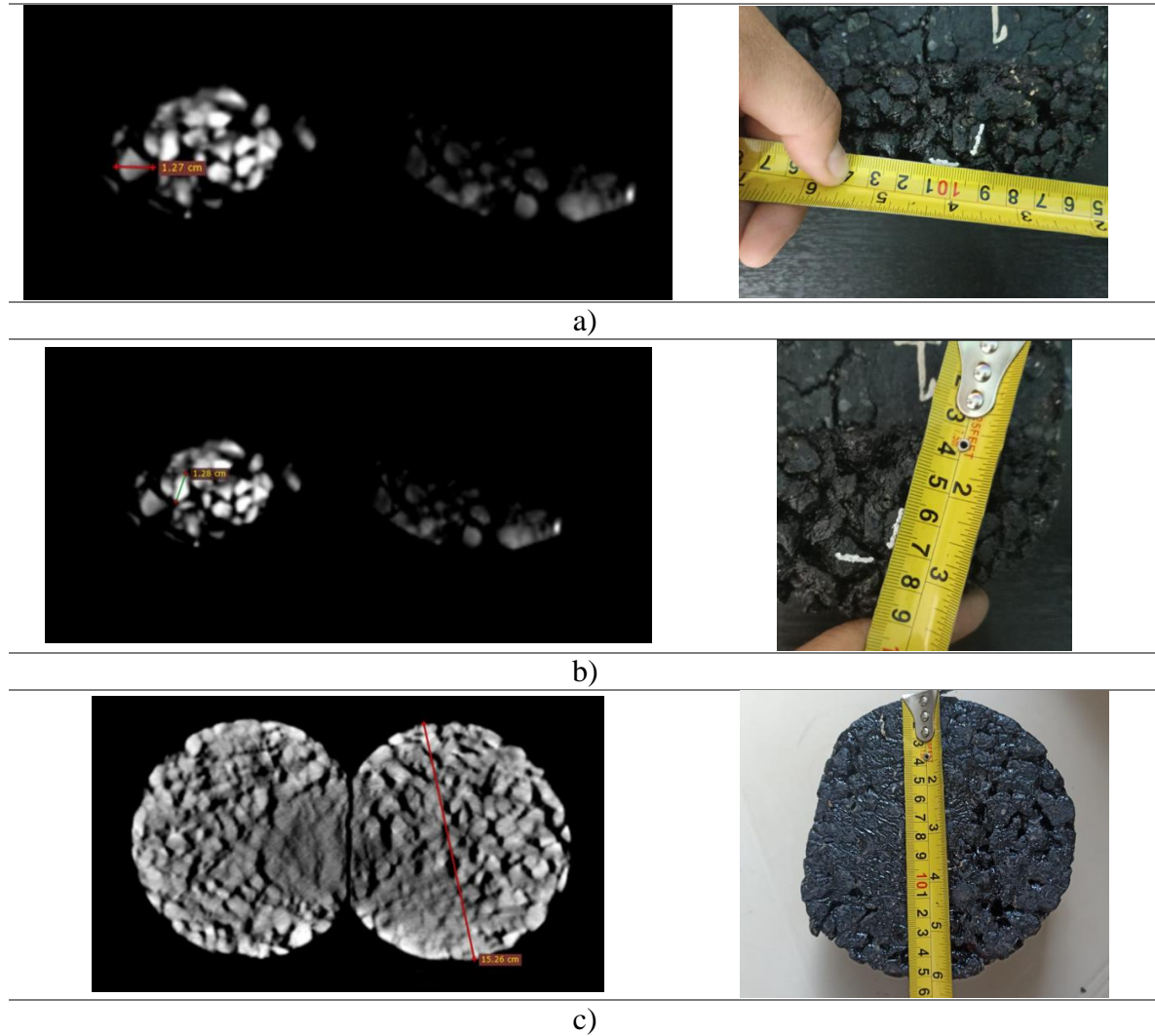
Nota: Valores de atenuación (en Unidades Hounsfield HU) para diferentes tejidos humanos. Fuente: (Ramirez et al., 2008).

Para lograr obtener imágenes del software RadiAnt acordes a la muestra física, fue necesario desarrollar la calibración del mismo. En este proceso, se observaron las superficies de las muestras tanto MDC 19 y SMA 12, 5, para detectar los agregados gruesos que se lograrán apreciar claramente y fueran prácticos de medir en sus dimensiones. A su vez, estos agregados se observaban en las imágenes digitales y con ajuste de escalas de grises, se buscó que estas unidades coincidieran las medidas digitales y físicas.

A continuación, en la **Figura 49** se presenta las imágenes de las medidas de agregados en las muestras de mezclas MDC 19 y SMA 12,5 y las imágenes de las medidas de los mismos en el software RadiAnt, para calibrar la escala de grises.

Figura 49

Imágenes de calibración escala de grises.



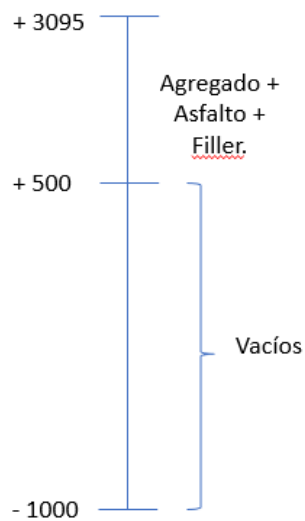
Nota: en la figura se aprecia que a) y b) corresponden a las medidas de agregados cubierto de asfalto visibles en la superficie y c) corresponde a la medida del diámetro de la unidad experimental 1. Fuente: Elaboración propia.

Mencionado lo anterior, para el estudio de las mezclas asfálticas se buscó una escala de Unidades Hounsfield (HU), en la cual se garantizó que la dimensión real de las partículas sólidas con su respectivo recubrimiento de asfalto y filler, se lograra en la imagen.

Así las cosas, se dividió la mezcla asfáltica en dos grupos visuales o ventanas, donde la primera ventana corresponde a agregados, asfalto y/o fibra y la segunda ventana corresponde a los vacíos. Lo anterior, se resume en la **Figura 50**.

Figura 50

Unidades Hounsfield (HU) Mezcla Asfáltica



Nota: Valores de atenuación (en Unidades Hounsfield HU) para mezclas asfálticas.

Fuente: Elaboración Propia.

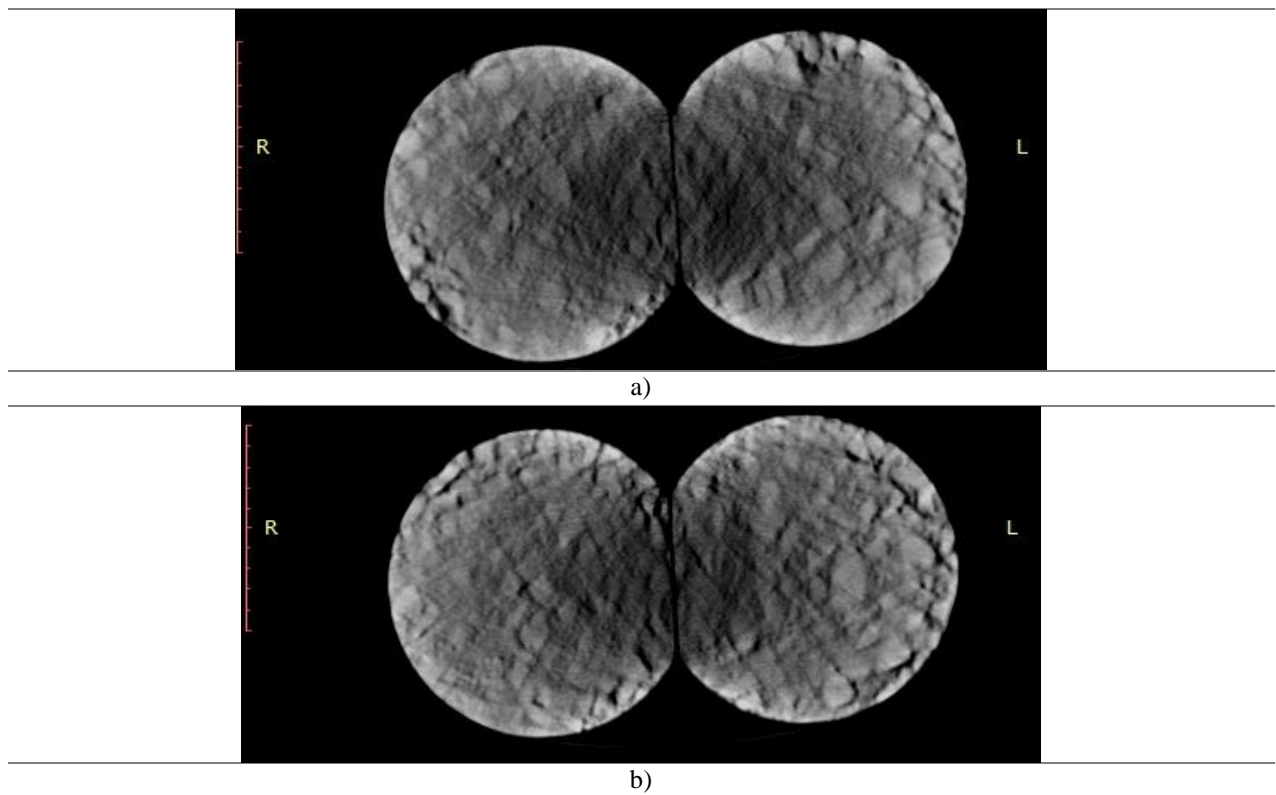
A continuación, se dan a conocer los resultados de tomografía computarizada en rayos X en las mezclas Asfálticas MDC 19 y SMA 12,5 previo a la falla:

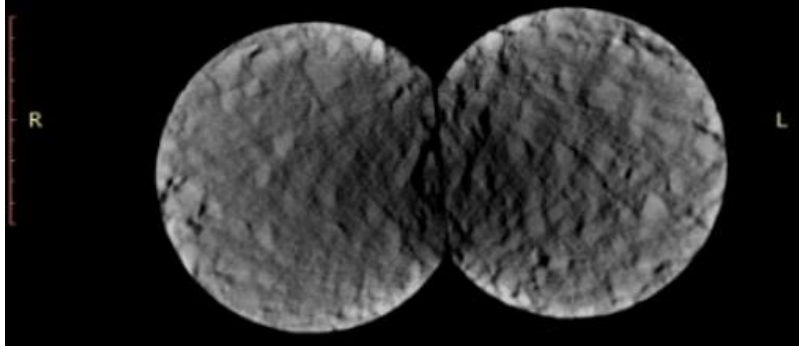
4.3.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).

Para apreciar la estructura interna de la mezcla asfáltica MDC 19 previa a la falla se presentan diferentes vistas, ángulos y tipos de imágenes obtenidas del software RadiAnt, relacionadas en las **figuras Figura 51, Figura 52, Figura 54 y Figura 55** con el fin de observar los elementos y la estructura que componen a las briquetas.

Figura 51

Sección por defecto Mezclas MDC 19





c)

Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 51**, que corresponde a las imágenes de las unidades experimentales de la mezcla MDC 19 generadas por defecto del software RadiAnt, se tiene que, estas imágenes son la primera impresión que genera el programa mediante el empleo del tomógrafo con la configuración automática o por defecto del mismo en escala de grises y contrastes. A lo anterior, cabe mencionar que para lograr una apreciación clara de los elementos que componen las mezclas y su organización internamente, es necesario ajustar parámetros como brillo, contraste, saturación, ángulos y la escala de unidades Hounsfield.

Los cortes que se presentan en la **Figura 51**, corresponden a una sección transversal de cada unidad experimental según la forma de toma del equipo, que fueron seleccionadas de todos los cortes posibles desarrollados en cada muestra como la mejor apreciación de esta.

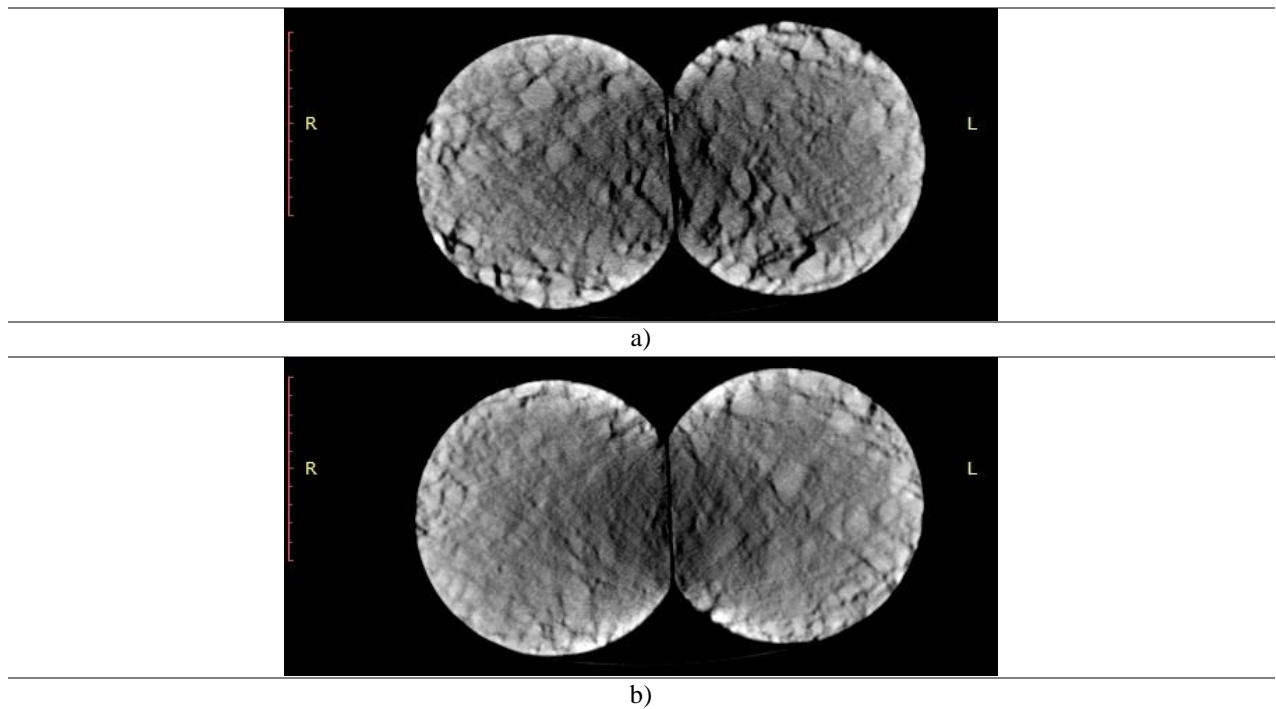
A su vez, se tiene que, en una apreciación visual rápida, las tres unidades experimentales de mezcla MDC 19 presentan similitud entre sí por ser producto de una misma fórmula de

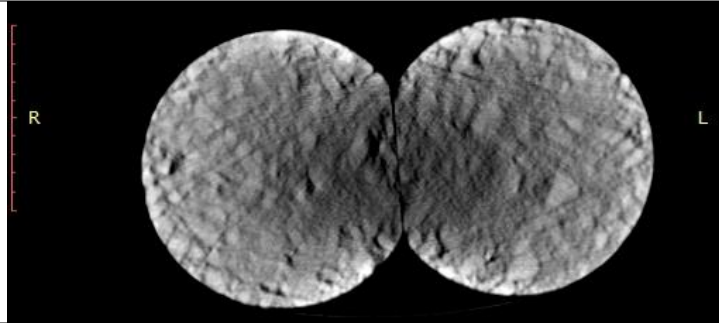
diseño. Claro está, que la distribución de los elementos componentes de la misma recalca la aleatoriedad en su organización de estructura interna.

Adicional, en las muestras de mezcla asfáltica MDC 19 de la **Figura 51**, se puede apreciar o deducir la silueta o forma de los agregados principalmente de la fracción gruesa, más los demás elementos como los vacíos, agregado fino y asfalto no son posible de identificar y, por tanto, se requiere hacer ajustes en el software que mejoren la imagen como se presenta en la **Figura 52**.

Figura 52

Muestras MDC 19 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield previo a ensayo Rueda de Hamburgo.





c)

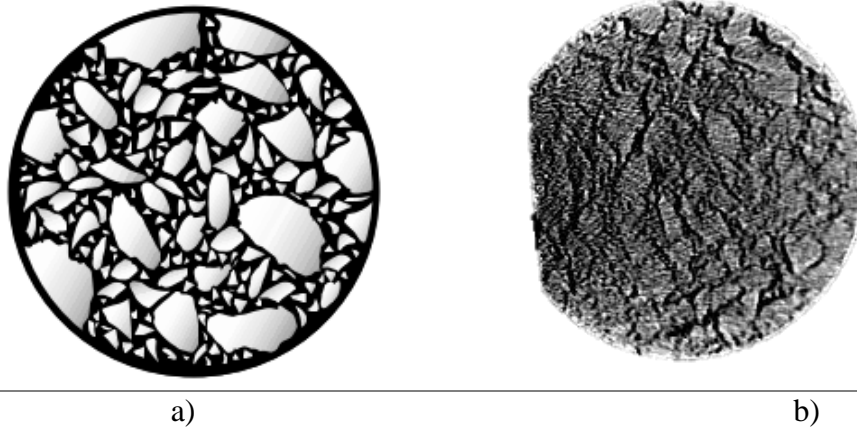
Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia

Las imágenes seleccionadas y presentadas en la **Figura 52**, corresponden al resultado del empleo de una ventana personalizada en unidades Hounsfield, asignadas previamente en la **Figura 50**, en la cual se definieron los grupos de elementos sólidos y vacíos. En las imágenes de las unidades experimentales, se logra ver las partículas de agregado totalmente definidas en los tonos más claros; en tono de grises más oscuros, se observa el llenante mineral en su combinación con asfalto y finalmente en color negro, se tienen los vacíos con aire que corresponden a un área pequeña como se define en el proceso de fabricación de 6%.

En las unidades experimentales, se tiene que la distribución de vacíos y agregados observados por medio del tomógrafo y el software RadiAnt, corresponde a la teoría que caracteriza la mezcla MDC 19, donde se observa la gradación gruesa y fina equilibrada para obtener la gradación continua de este tipo de mezcla, así como un cubrimiento homogéneo del mastic en las partículas y por tanto su condición densa como se permite comparar en la **Figura 53**, donde se tiene en a) mezcla MDC 19 ilustrada (NAPA, 2002) y en b) la imagen obtenida por medio de tomógrafo con rayos X y digitalizada mediante el software RadiAnt de una de las muestras de MDC 19 del presente trabajo.

Figura 53

Mezcla MDC 19 Ilustrada y tomografiada

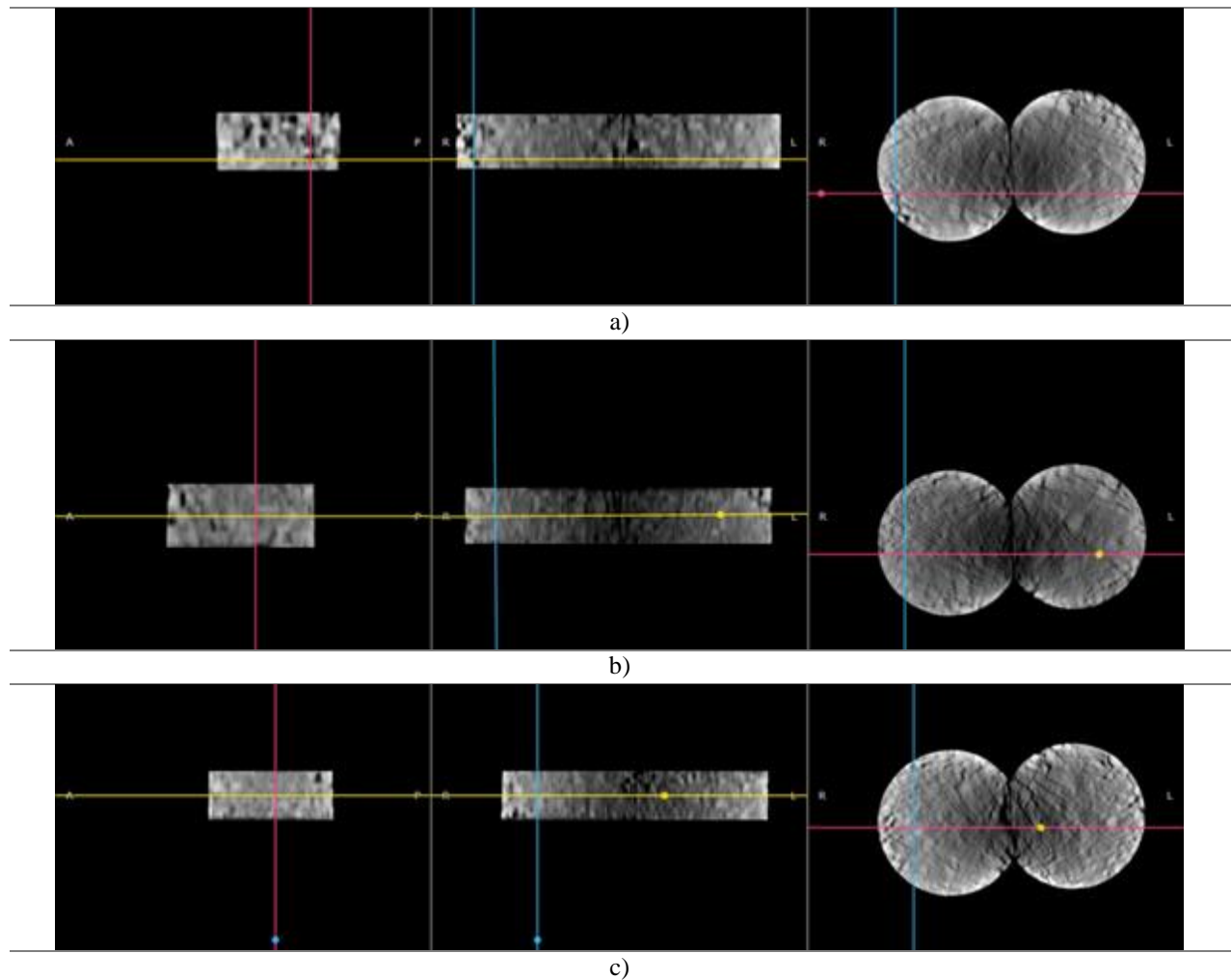


Nota: En la figura a) se observa la mezcla MDC 19 ilustrada (NAPA, 2002) y en b) tomografía con rayos X y procesamiento de imagen con software RadiAnt. Fuente: Elaboración propia.

Adicional, el software permite revisar la mezcla MDC 19 en diferentes ejes llamados reconstrucción multiplanar, que hace referencia a los cortes transversales, longitudinales y perpendiculares que presenta diferentes caras a través de la muestra. Se pueden obtener imágenes recreadas por el software que indican la distribución de las diferentes fases de la mezcla, como se muestra en la **Figura 54**.

Figura 54

Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas MDC 19 previo a Rueda de Hamburgo



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

De la **Figura 54**, se puede observar los tres cortes por los diferentes ejes de las unidades experimentales, generando una vista de la estructura interna de las mismas. En el orden de izquierda → derecha, se tiene que, para las tres unidades experimentales, la primera imagen corresponde a un corte perpendicular al eje de evaluación en el tomógrafo, donde el ancho corresponde al diámetro de la briqueta y la altura al espesor de la misma. La segunda imagen

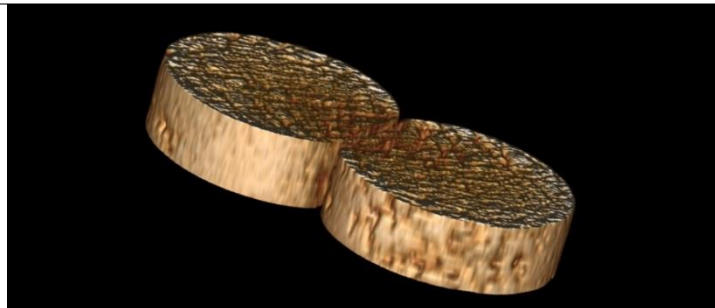
corresponde a un corte longitudinal donde se observa que el ancho es dos veces el diámetro de una briqueta, ya que abarca toda la unidad experimental y la altura corresponde al espesor de la briqueta. Finalmente, en la tercera imagen, corresponde a la sección transversal de la misma, donde se observa el área circular de las dos briquetas sin su espesor.

En general para las mezclas tipo MDC, se observan imágenes densas con una distribución de vacíos uniforme, característica de este tipo de mezclas. Permittiéndose ver la organización interna de los materiales de la briqueta, que fueron reconstruidos por el software y que al igual que en las imágenes transversales se maneja la misma escala de colores. Blanco para agregados, grises para mastic y negro para vacíos.

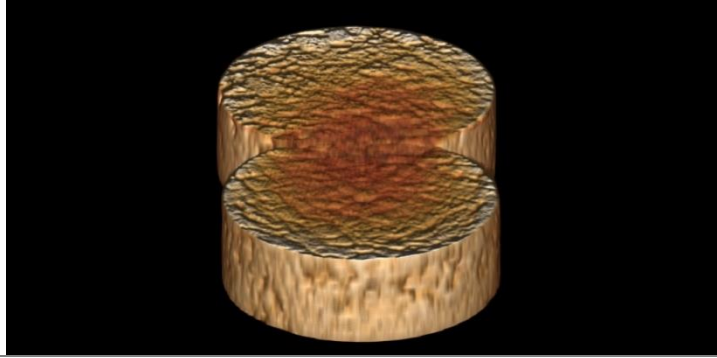
A su vez, el software RadiAnt, permite visualizar la muestra en un modelo 3D, generado por defecto por el mismo, este nos permite apreciar la estructura superficial de las unidades experimentales en las 3 direcciones como se ve en la **Figura 55**.

Figura 55

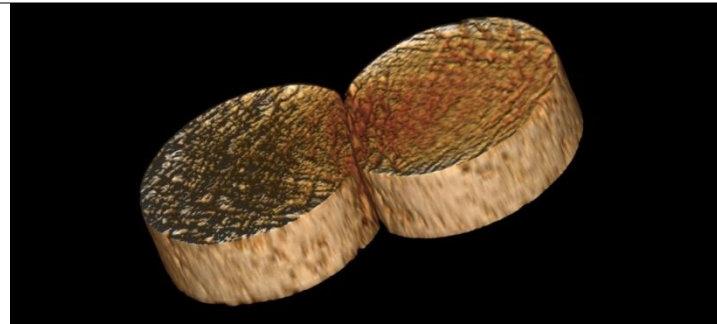
Modelo 3D Mezclas MDC 19 previo a ensayo Rueda de Hamburgo.



a)



b)



c)

Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos 3D, que se aprecian en la **Figura 55**, hacen alusión a la condición real de las muestras, donde el modelo se asemeja a la textura, forma y condición de una briqueta densa como lo es la mezcla asfáltica MDC 19.

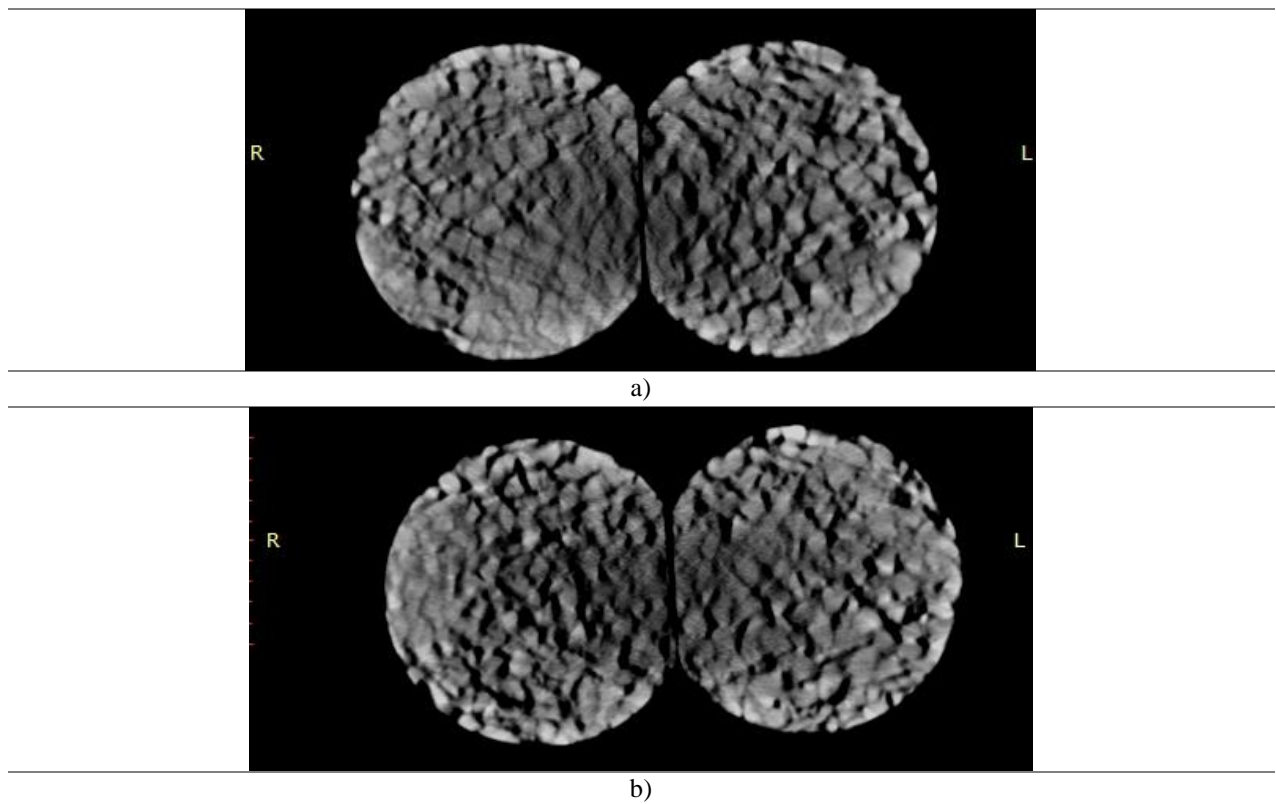
Con estas imágenes del modelo inicial de las unidades experimentales, se genera una base para el estudio de las deformaciones permanentes por ahuellamiento y del comportamiento de la estructura interna de las mismas, su distribución de esqueleto mineral y de vacíos con aire.

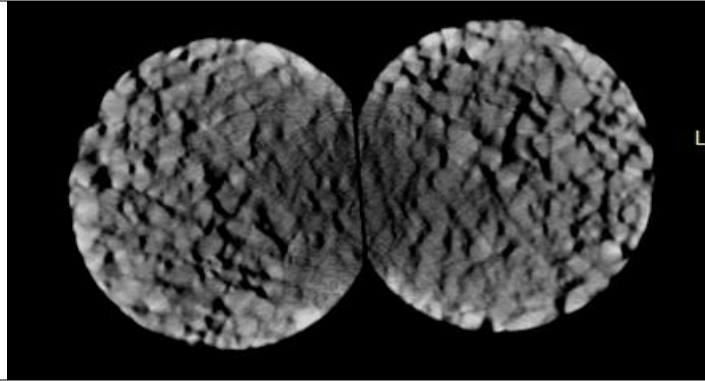
4.3.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)

Para apreciar la estructura interna de la mezcla asfáltica SMA 12,5 previa a la falla se presentan diferentes vistas, ángulos, y tipos de imágenes obtenidas del software RadiAnt, relacionadas en las **figuras** **Figura 56**, **Figura 58** y **Figura 59** con el fin de apreciar los elementos y la estructura que componen a las briquetas.

Figura 56

Muestras SMA 12,5 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield previo a ensayo.





c)

Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

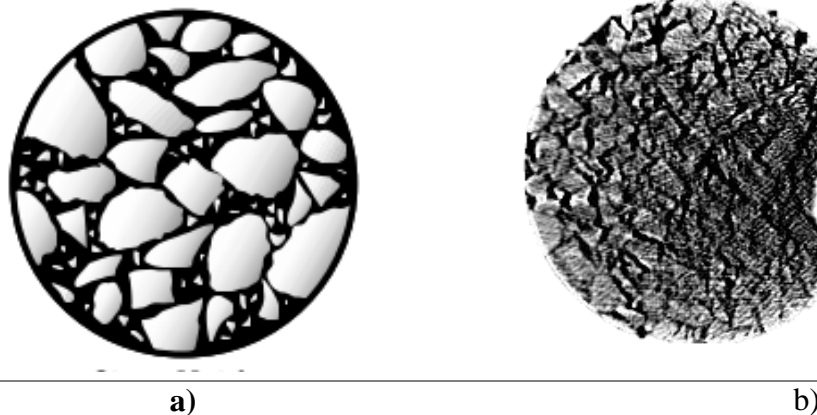
Las imágenes seleccionadas y presentadas en la **Figura 56**, corresponden al resultado del empleo de una ventana personalizada en unidades Hounsfield, asignadas previamente, en la cual se definieron los grupos de elementos sólidos y vacíos. Donde, al igual que en las mezclas MDC 19, para las imágenes de las unidades experimentales, se logra ver las partículas de agregado totalmente definidas en los tonos más claros; en tono de grises más oscuros, se observa el llenante mineral en su combinación con asfalto y finalmente en color negro, se tienen los vacíos con aire que corresponden a un área pequeña concentrada en diferentes puntos de la sección.

En las unidades experimentales, se tiene que la distribución de vacíos y agregados observados por medio del tomógrafo y el software RadiAnt, corresponde a la teoría que caracteriza la mezcla SMA 12,5. Donde se observa la gradación particular de las mismas, el agregado con un alto contenido de partículas gruesas, así como una capa de cubrimiento gruesa homogénea del mastic alrededor de los agregados generada por el alto contenido de asfalto y una distribución de vacíos que se presenta alrededor de los puntos de entramamiento entre las partículas gruesas.

De esta forma, en la **Figura 57** se tiene en a) mezcla SMA 12,5 ilustrada (NAPA, 2002) y en b) la imagen obtenida por medio del tomógrafo con rayos X y digitalizada mediante el software RadiAnt de una de las muestras de SMA 12,5 del presente trabajo, donde se evidencia la similitud entre la distribución y acomodación de los elementos que componen la mezcla asfáltica SMA

Figura 57

Mezcla SMA 12,5 Ilustrada y tomografiada

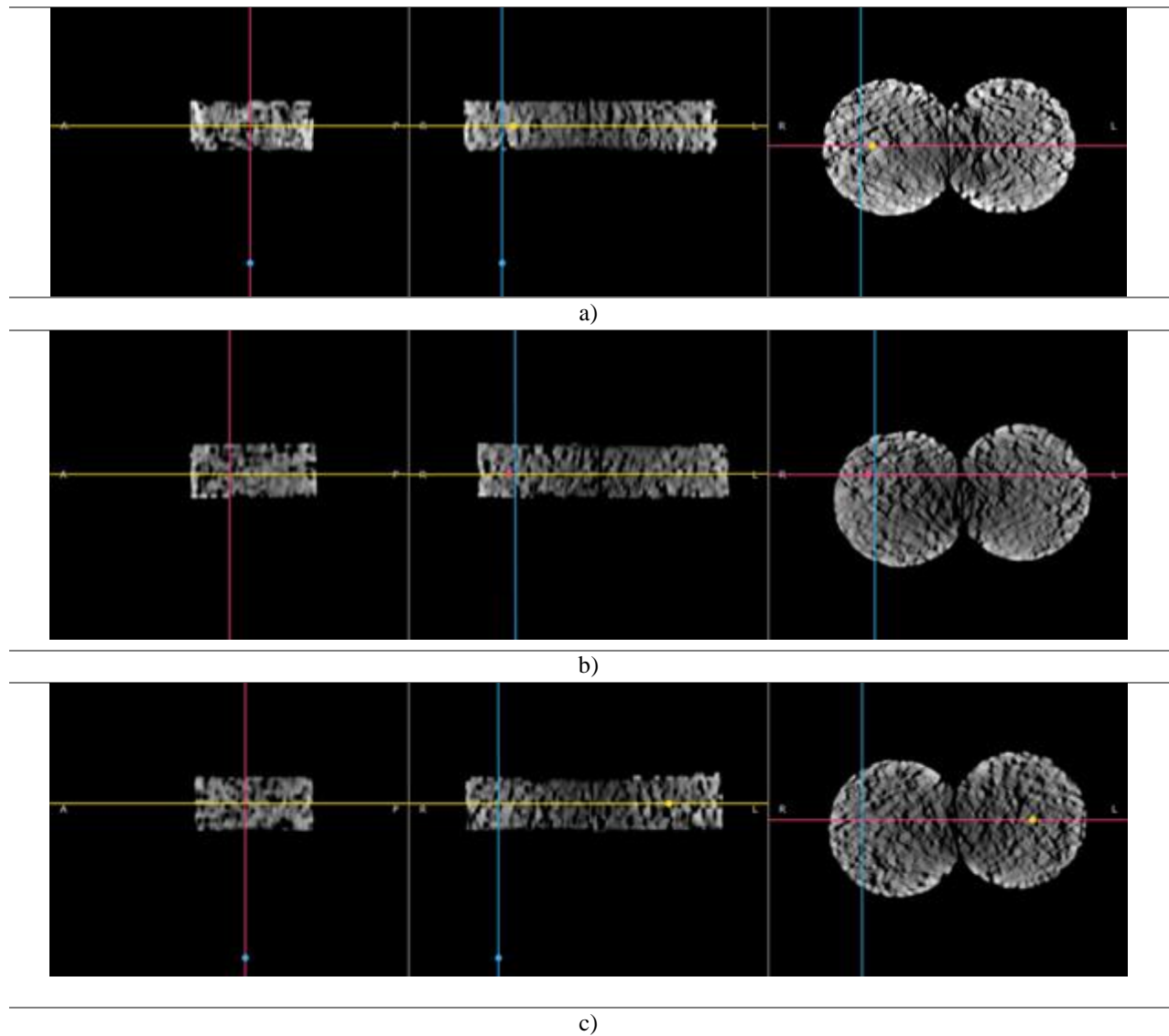


Nota: En la figura a) se observa la mezcla SMA 12,5 ilustrada (NAPA, 2002) y en b) tomografía con rayos X y procesamiento de imagen con software RadiAnt. Fuente: Elaboración propia.

En la **Figura 58** se presentan los cortes transversales, longitudinales y perpendiculares que muestran diferentes caras a través de la unidad experimental, generados por la reconstrucción multiplanar del software RadiAnt.

Figura 58

Cortes axiales y longitudinales de la muestra Mezclas SMA- 12,5



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

De la **Figura 58**, se puede observar la estructura interna de las unidades experimentales SMA 12,5, donde en general para las mezclas tipo SMA, se tiene una apariencia porosa de la estructura interna y una distribución de vacíos uniforme en todas las direcciones de las secciones.

Finalmente, en la **Figura 59** se visualizan las unidades experimentales SMA 12,5 en el modelo 3D, generado por el software RadiAnt, este nos permite apreciar la estructura superficial de las unidades experimentales en las 3 direcciones.

Figura 59

Modelo 3D Mezclas SMA 12,5.



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c)

Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia

Los modelos 3D, que se aprecian en la **Figura 59**, hacen alusión a la condición real de las muestras, donde el modelo se asemeja a la textura, forma y condición de briqueta abierta y de gradación gruesa como lo es la mezcla asfáltica SMA 12,5.

Con estas imágenes del modelo inicial de las unidades experimentales, se genera una base para el estudio de las deformaciones permanentes por ahuellamiento y del comportamiento de la estructura interna de las mismas, su distribución de esqueleto mineral y de vacíos con aire.

4.3.3. Análisis comparativo entre mezclas MDC-19 y SMA-12,5 en la fase de tomografía previa a la falla por ahuellamiento.

Una vez analizadas las imágenes y modelos obtenidos del proceso de tomografía, se observa que existen diferencias entre la distribución de agregados, asfalto y vacíos con aire en las estructuras internas de las unidades experimentales MDC-19 y SMA-12,5 y que los modelos generados son aproximados a la realidad.

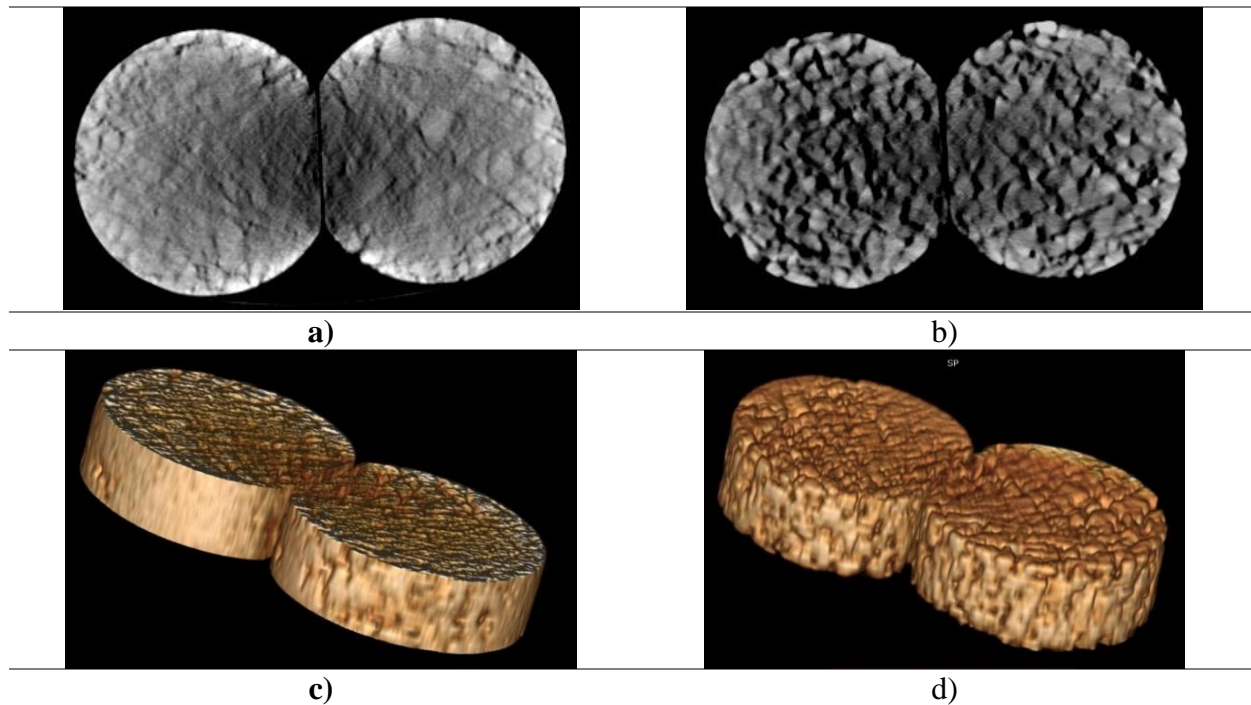
Para la mezcla MDC-19 se puede apreciar una distribución densa donde es difícil diferenciar los agregados finos que hacen parte del mastic con el asfalto, sin embargo, se identifican las partículas gruesas del agregado y se aprecia la distribución de vacíos, que entre las tres muestras tipo MDC-19 son similares mas no iguales, puesto que la distribución de los componentes es aleatoria.

Por otro lado, en las mezclas SMA-12,5 se aprecia una gradación de agregados abierta, donde priman las partículas gruesas del agregado en su mayoría, el mastic que se forma con las partículas finas y un excedente de asfalto por su alto contenido del mismo. A su vez, se observa la distribución de los vacíos con aire que, si bien representan un porcentaje del volumen similar al de las mezclas tipo MDC-19, la concentración y distribución de los mismos es diferente, generándose distribuciones de vacíos que la hacen asemejarse a una mezcla asfáltica abierta.

En la **Figura 60**, se presentan las muestras, donde a) y c) corresponden a la sección transversal y el modelo 3D respectivamente de la mezcla MDC 19; b) y d) pertenecen a la sección transversal y el modelo 3D respectivamente de la mezcla SMA 12,5.

Figura 60

Imágenes MDC 19 y SMA 12,5 Secciones comparativas previa a la falla.



Nota: en la figura se tiene secciones de muestras de MDC 19 y SMA 12,5 generadas de la tomografía previo a la evaluación de Rueda de Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.

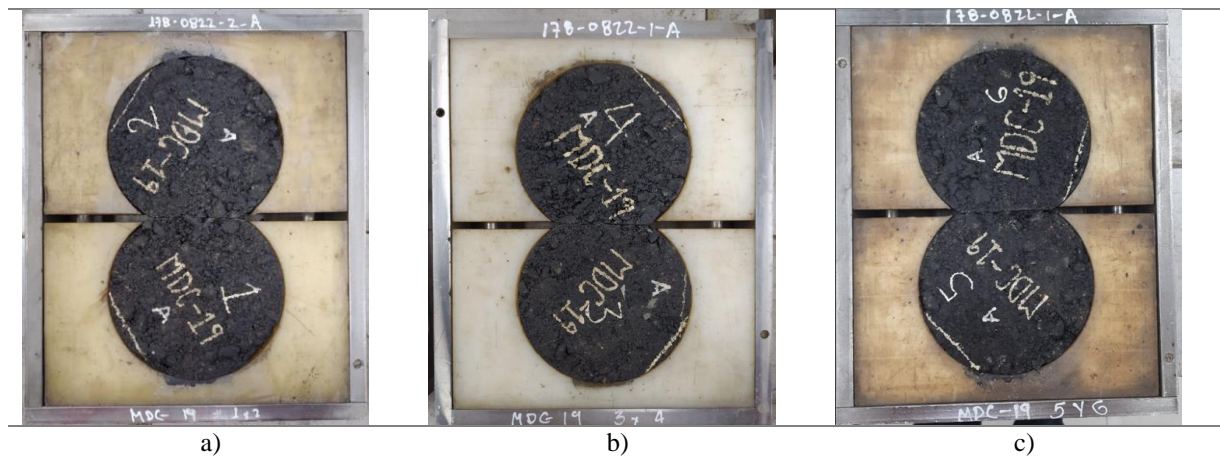
4.4. Fase 4: Ensayo de probetas en el equipo rueda de Hamburgo.

4.4.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).

A continuación, en la **Figura 61** se presenta registro fotográfico de las unidades experimentales de la mezcla MDC 19 previamente ensambladas en los moldes de rueda de Hamburgo.

Figura 61

Vista en planta de Unidades experimentales MDC 19

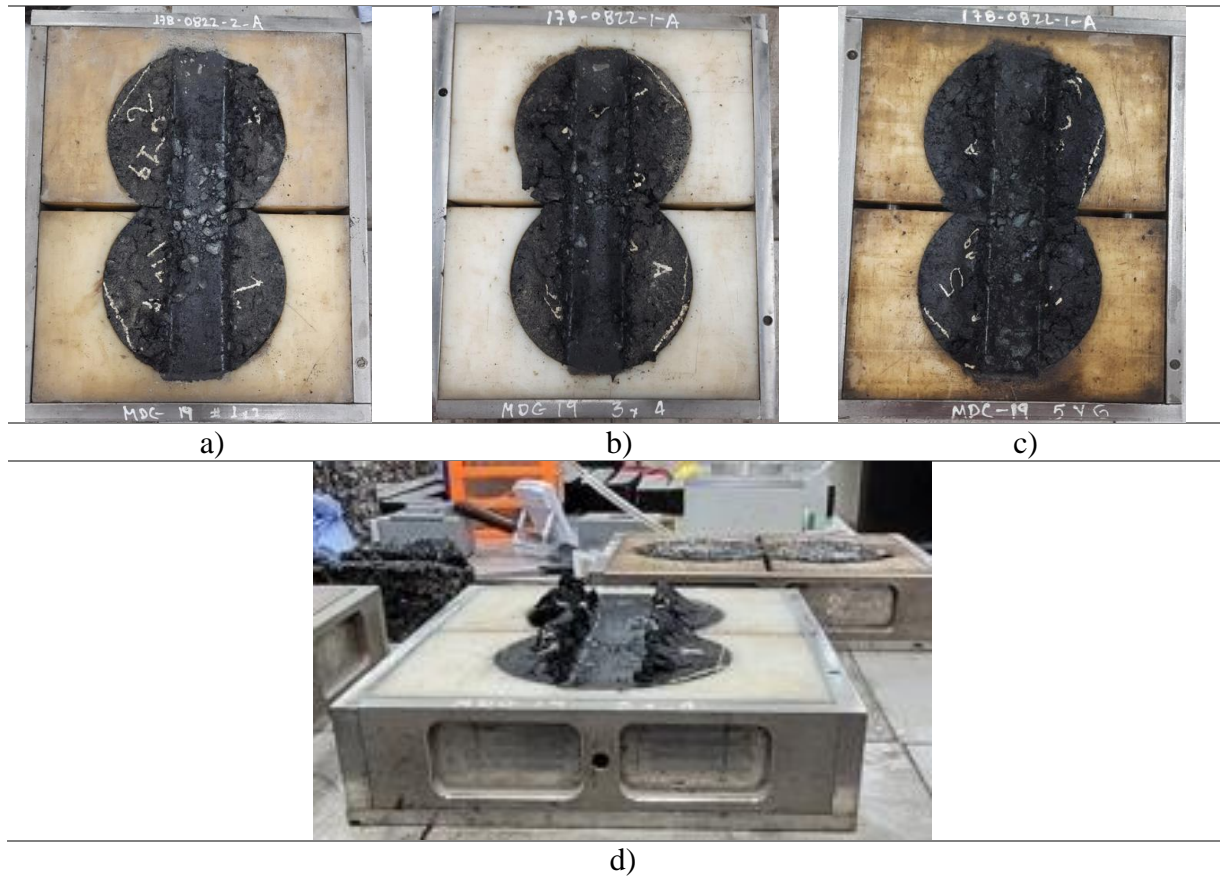


Nota: Las imágenes a), b) y c) corresponden a las unidades experimentales 1, 2 y 3 respectivamente de las mezclas MDC 19 para ensayo de Rueda de Hamburgo. Fuente Elaboración Propia.

En la **Figura 62** se presenta el estado final de la mezcla MDC 19 posterior al desarrollo del ensayo en el equipo Rueda de Hamburgo.

Figura 62

Unidades experimentales MDC 19 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo.

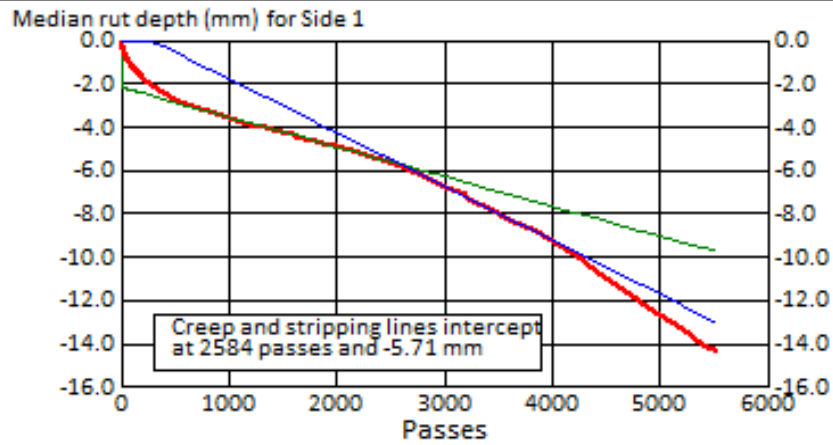


Nota: Las imágenes a), b) y c) corresponden a las unidades experimentales 1, 2 y 3 respectivamente junto con la imagen d) que presenta un perfil de las mezclas MDC 19 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo. Fuente Elaboración Propia.

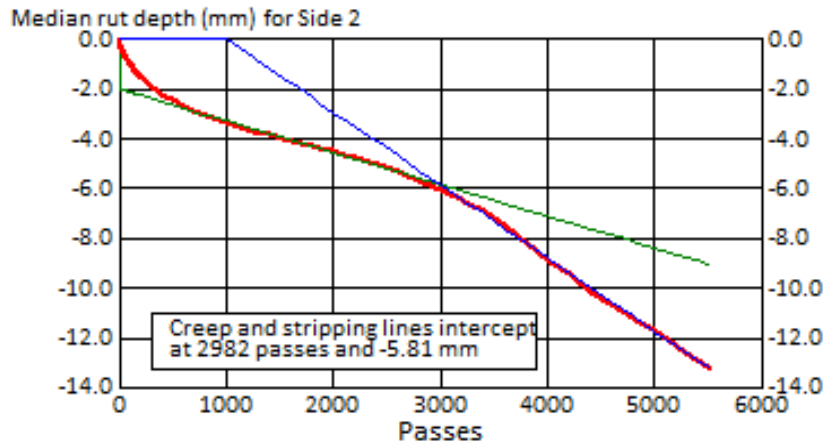
A su vez, el software del equipo de Rueda de Hamburgo genera las gráficas de deformación vs número pasadas para cada una de las unidades experimentales evaluadas, las cuales se dan a conocer mediante la **Figura 63**.

Figura 63

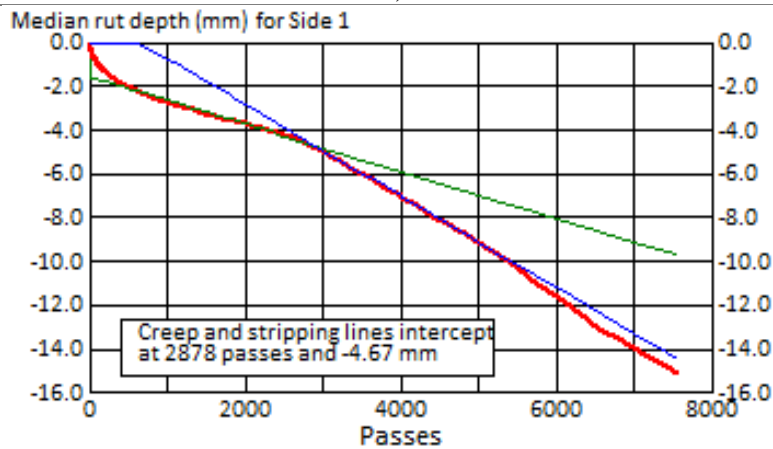
Comportamiento MDC 19 en ensayo Rueda Hamburgo.



a)



b)



c)

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas MDC19. Fuente: Laboratorio Humberto Quintero.

De la **Figura 63**, cuyos resultados se resumen en la **Tabla 40**, se observa que las tres unidades experimentales de mezcla MDC 19 alcanzaron su punto Creep o punto de Inflexión alrededor de 2815 pasadas y con deformación de 5,40 mm en promedio. Sin embargo, en la continuidad del ensayo para llegar a alguno de los límites establecidos, ya sea 20000 pasadas o deformación permanente máxima de 12,5 mm, se obtuvo que las tres muestras lograron el criterio de máxima deformación permitida en el equipo alrededor de las 5501 pasadas en promedio.

Tabla 40.

Resultados de ahuellamiento en las mezclas MDC 19 según Norma.

Muestra	Punto de inflexión en las muestras		N de pasada en deformación permanente de 12,5 mm
	N de pasadas	Deformación Permanente mm	
Unidad experimental 1	2584	5,71	4950
Unidad experimental 2	2982	5,81	5230
Unidad experimental 3	2878	4,67	6325
Promedio	2815	5,40	5501

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas MDC-19 a número de pasadas de punto Creep y deformación 12,5 mm.

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar, que una vez alcanzado los límites de la prueba Rueda de Hamburgo establecidos para las mezclas MDC 19, en este caso la deformación máxima permitida de 12,5 mm, se dejó continuar el desarrollo del ensayo cierto número de pasadas más, lo que incrementó

la deformación en cada muestra y, por tanto, la huella final registrada por el deformímetro del equipo se resume en la **Tabla 41**.

Tabla 41

Resultados de ahuellamiento en las mezclas MDC 19, máxima deformación alcanzada.

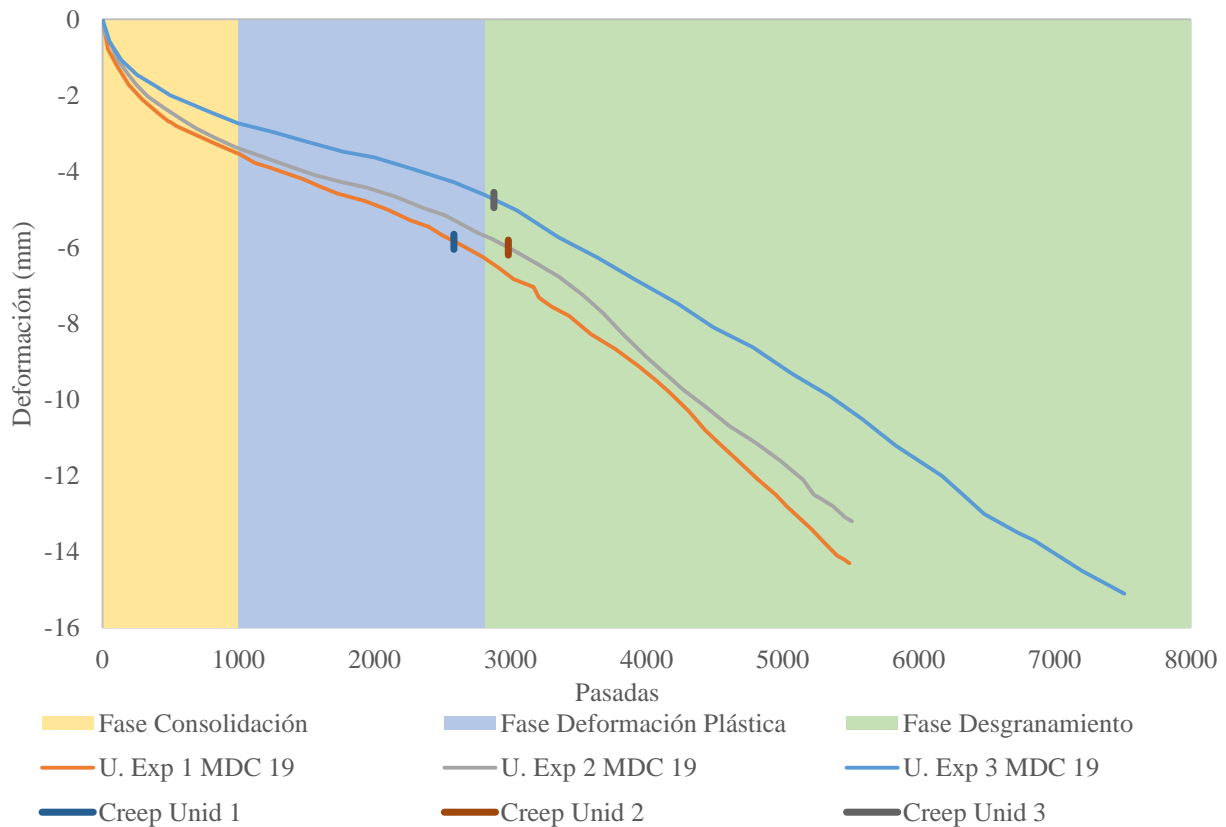
	N de pasada registradas	Deformación permanente mm
Unidad experimental 1	5490	-14,3
Unidad experimental 2	5510	-13,2
Unidad experimental 3	7510	-15,1

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas MDC-19 a máximo número de pasadas. Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 64** presenta la superposición de las tres unidades experimentales MDC 19 probadas en Rueda de Hamburgo, de la cual se puede observar las fases de consolidación, deformación plástica y desgranamiento. A su vez, estas se resumen en la **Tabla 42**.

Figura 64

Deformación en Rueda de Hamburgo MDC 19. Unidades experimentales 1, 2 y 3



Nota: En la figura se muestran los resultados de deformación vs No de pasadas superpuestos de las unidades experimentales 1, 2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.

Para las fases mencionadas, se asignaron los rangos: Entre 0 – 1000, Zona de consolidación, definida con base a resultados de múltiples muestras evaluadas en investigaciones previas (Flores et al., 2018); entre 1000 – 2815 en promedio, Zona de deformación plástica y finalmente entre 2815 – 5501 en promedio, la zona de desgranamiento.

Tabla 42*Fases del Ensayo Rueda de Hamburgo en las mezclas MDC 19.*

		Zona de consolidación	Zona de deformación plástica	Zona de desgranamiento
Unidad experimental 1	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2584	De 2584 a 4950
	Pendiente	54,00%	14,44%	28,70%
Unidad experimental 2	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2982	De 2982 a 5230
	Pendiente	48,80%	13,58%	31,00%
Unidad experimental 3	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2878	De 2878 a 6325
	Pendiente	40,00%	11,23%	29,76%
Promedio		47,60%	13,08%	27,06% %

Nota: En la tabla se muestran los límites de las zonas generadas en la deformación por la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas MDC 19. Fuente: Elaboración Propia.

De la **Figura 64** y **Tabla 42** se observa que, al iniciar el funcionamiento del equipo de rueda de Hamburgo, las tres unidades experimentales con similar comportamiento dan comienzo a la etapa de consolidación, que se delimita entre 0 y 1000 pasadas de la rueda, con una pendiente de deformación de 47,60 % en promedio. Siendo la pendiente más fuerte del ensayo por el rápido acomodo inicial que se presenta en los materiales durante esta etapa ya que las mezclas asfálticas manejan un contenido inicial de $7 \pm 1\%$ de vacíos.

Una vez culminó la etapa de consolidación, se da inicio a la etapa Creep que va hasta el punto de Inflexión el cual se encuentra alrededor de 2815 pasadas con 5,40 mm de deformación permanente promedio. En esta zona se generó pendiente promedio de 13,08 % que corresponde al menor valor de todo el ensayo. Es decir, se requieren alrededor de 2815 pasadas del equipo para que la mezcla MDC 19 llegue al límite de comportamiento plástico e indica que en este

punto se tiene una deformación no recuperable y a su vez, las muestra continúan dentro de los límites establecidos por la norma lo que permitió dar continuidad al desarrollo del ensayo.

Considerando que el ensayo de rueda de Hamburgo se desarrolló en condición de inmersión en agua a 50 °C constante, se evaluó la fase final de la prueba que corresponde a la susceptibilidad a la humedad de la mezcla y esta comienza a partir del punto de inflexión definido a 2815 pasadas y 5,40 mm de deformación. En esta sección incrementa la pendiente a un 27,06 % indicando que el deterioro de la muestra se acelera y se empieza a generar el efecto de stripping o desgranamiento, donde, los materiales asfalto y agregado se separan por el efecto que genera el agua en la mezcla. Esta condición continua hasta llegar a la máxima deformación permitida de 12,5 mm, que se logra alrededor de las 5501 pasadas en promedio en Rueda de Hamburgo.

Mencionado lo anterior, para cada unidad experimental se tiene que, las tres muestras generaron un comportamiento similar en cuanto a las pendientes de cada fase, al igual que el lineamiento de las curvas. Sin embargo, cabe mencionar que para la muestra 3, la deformación se estabilizó de una manera anticipada respecto a las otras dos muestras, es decir que presentó una consolidación inicial más rápida que las otras dos, haciendo que, en la continuidad del ensayo, el orden de las deformaciones permanentes fuese menores y, por tanto, fue necesario mayor número de pasadas para lograr 12,5 mm al final de la prueba.

Dado que el número de muestras que se tiene para las mezclas MDC 19 corresponde a tres y que dos de ellas presentaron similitud y la tercera difiere, es necesario en futuras

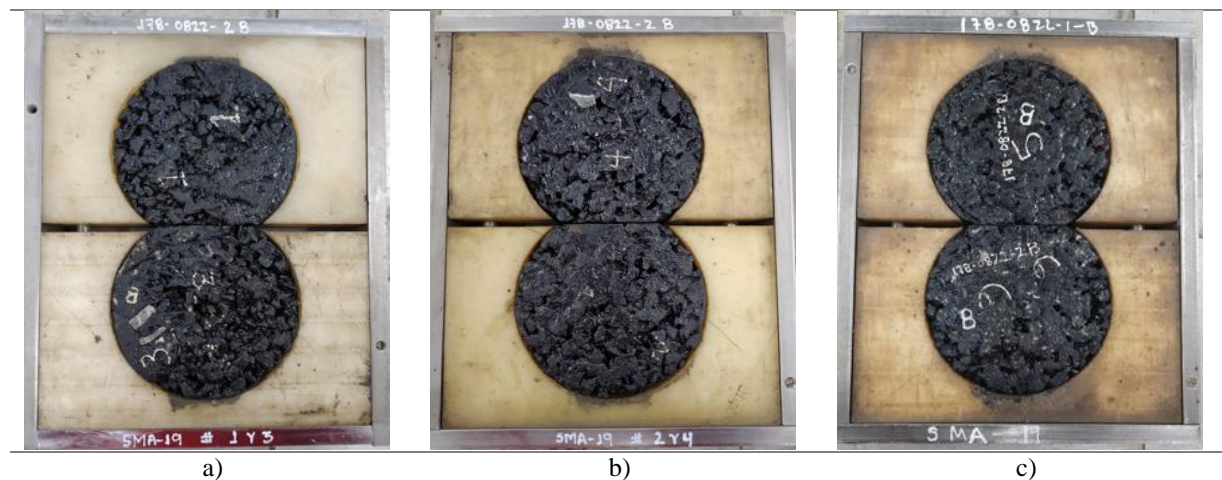
investigaciones evaluar un mayor número de muestras para implementar un análisis estadístico que permita identificar tendencias de comportamiento.

4.4.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5).

A continuación, en la **Figura 65** se presenta registro fotográfico de las unidades experimentales de la mezcla SMA 12,5 mm previamente ensambladas en los moldes de rueda de Hamburgo.

Figura 65

Vista en planta de Unidades experimentales SMA 12,5.

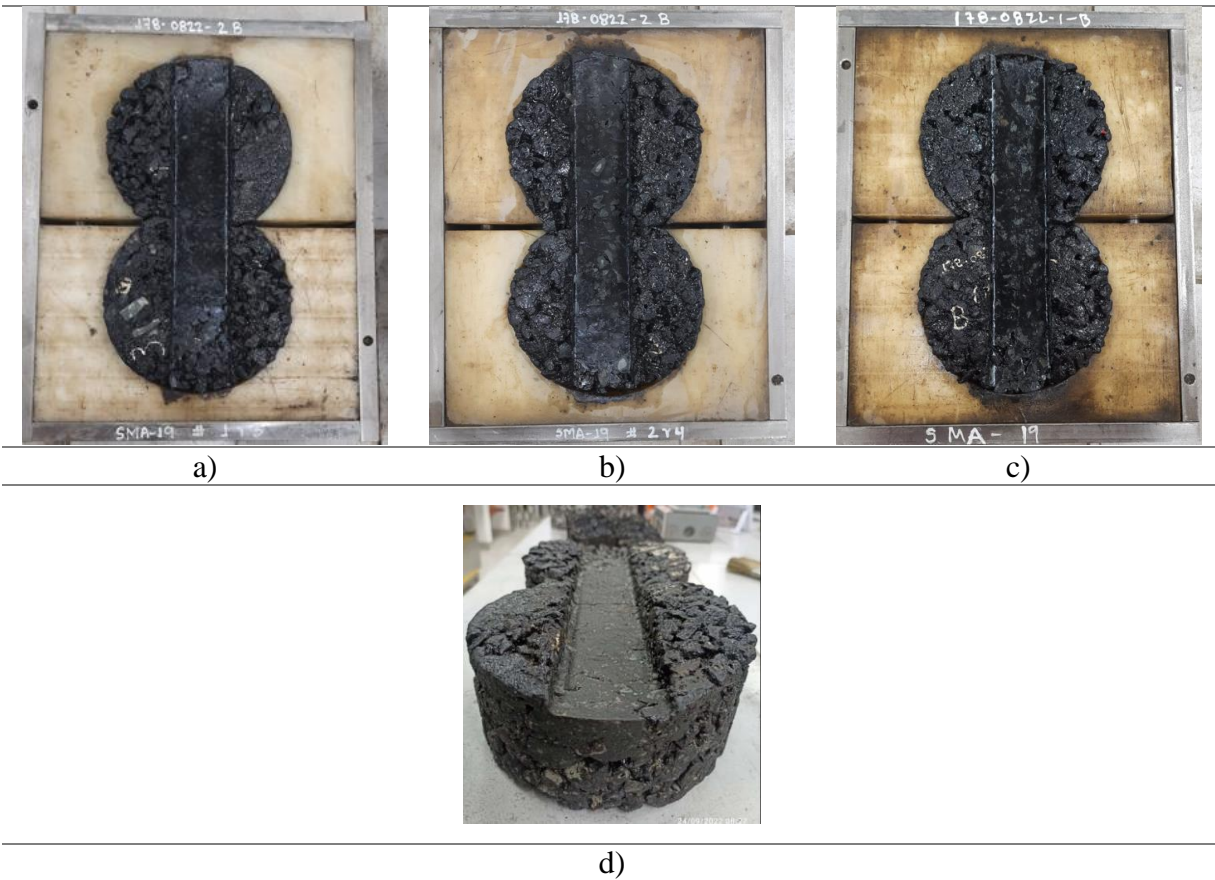


Nota: Las imágenes a), b) y c) corresponden a las unidades experimentales 1, 2 y 3 respectivamente de las mezclas SMA 12,5 ensambladas en los moldes de prueba Rueda de Hamburgo. Fuente Elaboración Propia

En la **Figura 66** se presenta el estado final de la mezcla MDC 19 posterior al desarrollo del ensayo en el equipo Rueda de Hamburgo.

Figura 66

Unidades experimentales MDC 19 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo

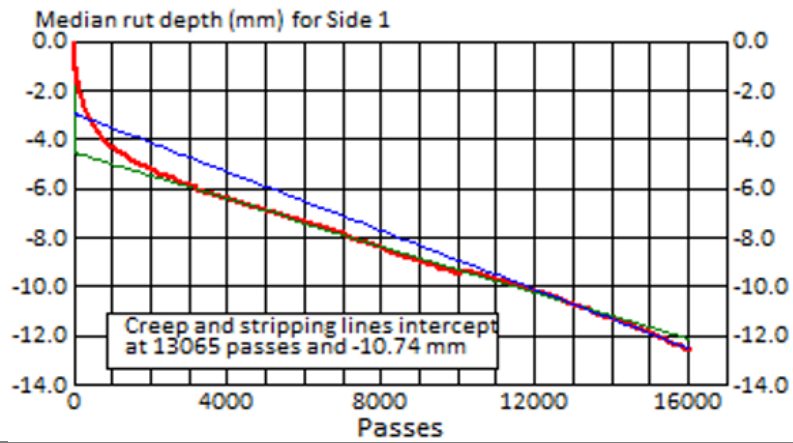


Nota: Las imágenes a), b) y c) corresponden a las unidades experimentales 1, 2 y 3 respectivamente y la imagen d) presenta un perfil de las mezclas SMA 12,5 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo. Fuente Elaboración Propia.

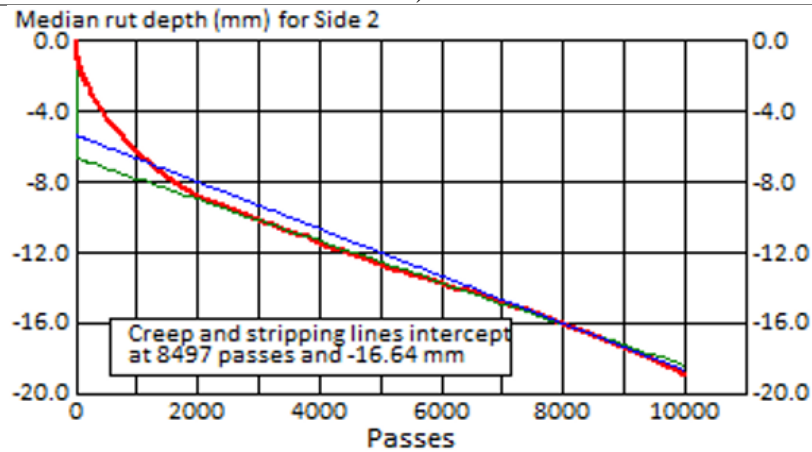
A su vez, en el software del equipo de Rueda de Hamburgo desarrollado a las 3 unidades experimentales de la mezcla SMA 12,5, se generan gráficas de deformación vs número pasadas, las cuales se dan a conocer mediante la **Figura 67**

Figura 67

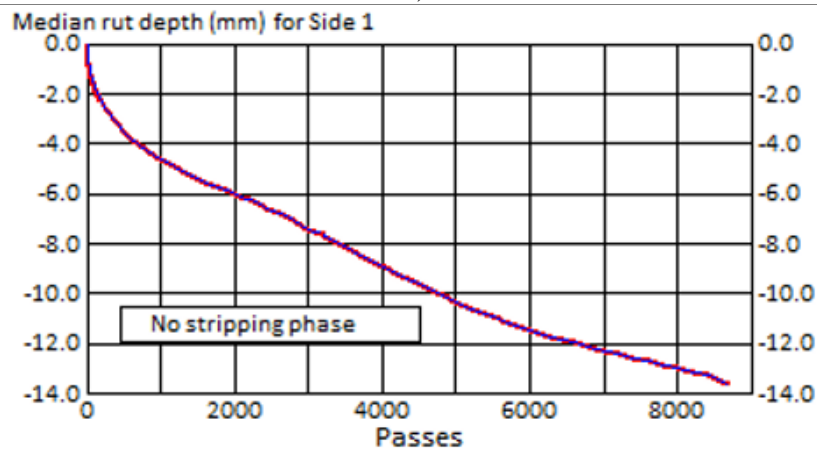
Comportamiento SMA 12,5 en ensayo Rueda Hamburgo.



a)



b)



c)

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas SMA 12,5. Fuente: Laboratorio Humberto Quintero.

De la **Figura 67** cuyos resultados se resumen en la **Tabla 43** se observa que las tres unidades experimentales de mezcla SMA 12,5 presentaron un resultado variado para cada unidad experimental, donde únicamente para las muestras 1 y 2 se generaron puntos Creep o puntos de Inflexión durante la prueba, los cuales se lograron en diferentes momentos: a los 13065 pases para la muestra 1 y a los 8497 pases para la muestra 2.

Por otro lado, la unidad experimental 3 no presentó punto Creep, indicando que, durante el ensayo de Rueda Hamburgo, solo tiene presente en ella las fases de consolidación y deformación plástica. Es decir, que para este caso no se tiene registro de susceptibilidad al agua.

Las tres unidades experimentales, en la continuidad del ensayo de Rueda de Hamburgo llegaron al límite de deformación permanente máxima de 12,5 mm antes que, a las 20000 pasadas, alcanzando la máxima deformación de huella permitida alrededor de las 15900, 4870 y 7270 pasadas respectivamente. Lo anterior, indica que entre las tres muestras se presentaron grados de rendimiento diferentes, pero gráficamente se puede observar que las tres generan similar comportamiento.

Del ensayo de Rueda de Hamburgo generado a las 3 unidades experimentales de la mezcla SMA 12,5 mm, se tiene los siguientes resultados:

Tabla 43.*Resultados de ahuellamiento de las mezclas asfálticas SMA 12,5.*

MUESTRA	PUNTO DE INFLEXIÓN EN LAS MUESTRAS		N de pasada en deformación permanente de 12, 5 mm
	N de pasadas	Deformación Permanente mm	
Unidad experimental 1	13065	10.74	15900
Unidad experimental 2	8497	16.64	9930
Unidad experimental 3			7270

Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas SMA-12,5. a número de pasadas de punto Creep y deformación 12,5 mm. Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar, que una vez alcanzado los límites de la prueba Rueda de Hamburgo establecidos para las mezclas SMA 12,5, en este caso la deformación máxima permitida de 12,5 mm, se dejó continuar el desarrollo del ensayo cierto número de pasadas más, lo que incrementó la deformación en cada muestra y, por tanto, la huella final registrada por el deformímetro del equipo se resume en la **Tabla 44**

Tabla 44*Resultados de ahuellamiento en las mezclas SMA 12,5, máxima deformación alcanzada.*

	N de pasada registradas	Deformación permanente mm
Unidad experimental 1	16000	-12.6
Unidad experimental 2	9930	-18,8
Unidad experimental 3	8650	-13,5

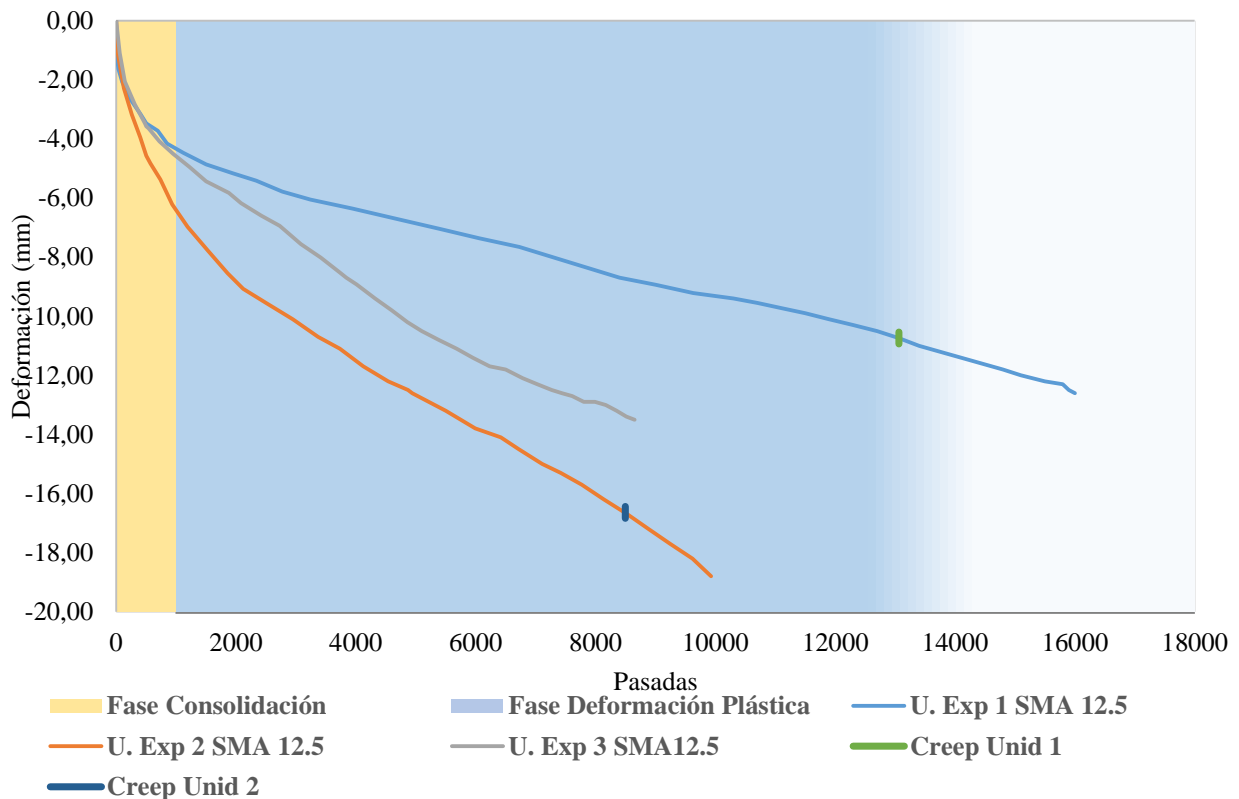
Nota: En la tabla se muestran los resultados obtenidos en la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas SMA 12,5 a máximo número de pasadas. Fuente: Elaboración Propia.

Dado que el número de muestras que se tiene para las mezclas SMA 12.5 corresponde a tres, es necesario que en una futura investigación se evalúe un mayor número de muestras para implementar un análisis estadístico que permita identificar tendencias de comportamiento.

La **Figura 68** presenta la superposición de las tres unidades experimentales SMA 12,5 probadas en Rueda de Hamburgo, de la cual se puede observar las fases consolidación, deformación plástica y desgranamiento.

Figura 68

Deformación en Rueda de Hamburgo SMA 12,5 Unidades Experimentales 1, 2 y 3.



Nota: En la figura se muestran los resultados de deformación vs No de pasadas superpuestos de las unidades experimentales 1,2 y 3. Fuente: Elaboración Propia.

Para las fases mencionadas, se asignaron los rangos: Entre 0 – 1000, Zona de consolidación; las Zona de deformación plástica y de desgranamiento varían de acuerdo a cada muestra, esto se puede observar en la **Tabla 45**

Tabla 45

Fases del Ensayo Rueda de Hamburgo en las mezclas SMA 12,5.

		Zona de consolidación	Zona de deformación plástica	Zona de desgranamiento
Unidad experimental 1	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2584	De 2584 a 4950
	Pendiente	-90,36%	4,75%	6,21%
Unidad experimental 2	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2982	De 2982 a 5230
	Pendiente	-93,24%	11,62%	15,07%
Unidad experimental 3	Datos	De 0 a 1000	De 1000 a 2878	De 2878 a 6325
	Pendiente	-86,55%	11,75%	NO APLICA
		-90,05%		

Nota: En la tabla se muestran los límites de las zonas generadas en la deformación por la prueba Rueda de Hamburgo para las mezclas SMA 12,5. Fuente: Elaboración propia.

De la **Figura 68** y **Tabla 45** se observa que, al iniciar el funcionamiento del equipo de rueda de Hamburgo, las tres unidades experimentales dan comienzo a la etapa de consolidación, que se delimita entre 0 y 1000 pasadas de la rueda, donde se presenta similar pendiente de consolidación, del orden de 90,05 %. De esta zona, se puede evidenciar la pendiente más fuerte del ensayo por el rápido acomodo inicial que se presenta en los materiales durante esta etapa ya que las mezclas asfálticas manejan un contenido inicial de $7 \pm 1\%$ de vacíos.

Una vez culmina la etapa de consolidación se da inicio a la etapa Creep que fue diferente para las tres unidades experimentales, quedando así:

La Unidad experimental 1, finaliza su estado plástico en 13065 pasadas con -10,74 mm de deformación y por tanto pendiente de 4,75%. A lo que se tiene que alcanzo el punto de inflexión previo a lograr uno de los límites del ensayo, ya sea 20000 pasadas y/o 12,5 mm de deformación permanentes. Por tanto, continua el desarrollo del ensayo en la siguiente fase.

La Unidad experimental 2, finaliza su estado plástico en 8497 pasadas con -16,64 mm de deformación y por tanto pendiente de 11,62%. A su vez, la muestra alcanzó el punto de inflexión después del límite del ensayo de 12,5 mm de deformación máxima permitida; sin embargo, se continuó con la prueba hasta el limitante del equipo, sin generar afectación al mismo. Esto se debe a que, las unidades experimentales 1 y 2 de SMA 12,5 fueron evaluadas a la par y la muestra 1, a las 8497 pasadas estaba alrededor de -8,69 mm de deformación, lo que hacía necesario dar la continuidad al equipo.

La Unidad experimental 3, durante el periodo del ensayo, no presentó punto de inflexión de la zona plástica, es decir, que alcanzó el límite del ensayo de 12,5 mm de deformación máxima permitida durante su fase de deformación plástica. Llegando con una deformación máxima de 13,5 mm a las 8650 pasadas previo a la detención del equipo.

Así, las cosas, las unidades experimentales 2 y 3 superaron 12,5mm de deformación máxima permitida durante la fase de deformación plástica, indicando, que las mezclas SMA en su desempeño superan los límites establecidos por la norma. Por otro lado, la muestra 1 también superó los 12,5 mm de deformación posterior a esta fase.

Para terminar, en la fase de desgranamiento definida a partir del punto creep se tuvo que:

La unidad experimental 1 alcanzó el límite máximo de deformación permanente de 12,5 mm a las 15900 pasadas, momento en el que se detuvo el ensayo, observándose que entre la fase de deformación plástica y la fase de desgranamiento las pendientes en esta fase se incrementaron levemente a 6,21 % con respecto a la fase de deformación plástica.

La unidad experimental 2 durante el periodo de desgranamiento ya había superado el límite máximo de deformación de 12,5 mm, sin embargo, se dio continuidad al ensayo alcanzando una deformación de 18,8 mm a las 9930 pasadas, momento en que se detuvo el ensayo para evitar afectaciones en el equipo. Para esta muestra se observó que entre la fase de deformación plástica y la fase de desgranamiento las pendientes incrementaron levemente con respecto a la fase previa a alrededor del 15%.

La unidad experimental 3 durante el periodo del ensayo no presentó fase de desgranamiento, conservando una pendiente de la curva del 11,75%.

De esta forma se puede observar que las tres unidades experimentales independientes entre sí, presentaron una variación mínima de la velocidad de deformación entre las fases de deformación plástica y desgranamiento.

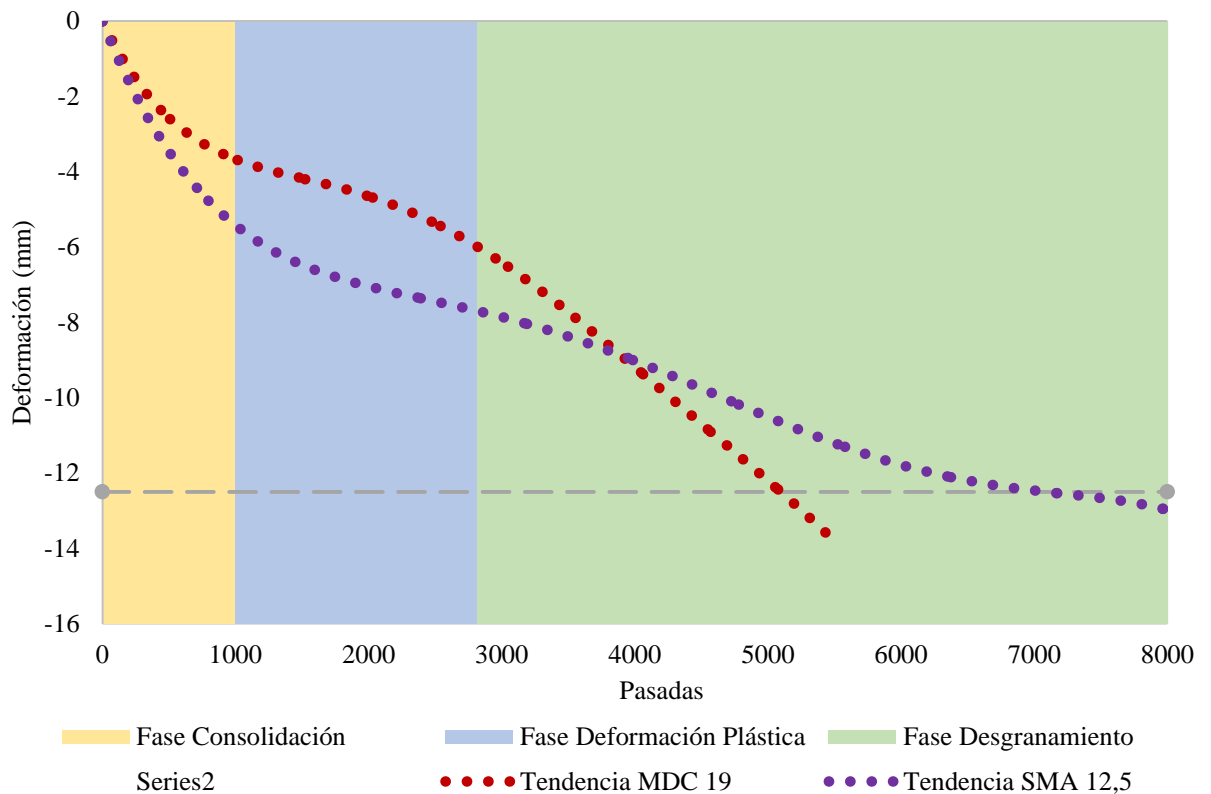
4.4.3. Análisis comparativo entre mezclas MDC-19 y SMA-12,5 en la fase de Rueda de Hamburgo de Hamburgo.

Una vez desarrollado el ensayo de Rueda de Hamburgo para las mezclas MDC 19 y SMA 12,5 y analizadas de manera independiente, se hace necesario mirar las diferencias del ensayo entre ellas, teniéndose así la

Figura 69.

Figura 69

Curvas de comportamiento de mezclas MDC 19 vs SMA 12,5 en Rueda de Hamburgo



Nota: En la figura se tiene gráficamente el comportamiento de deformación vs pasadas obtenidas para el ensayo Rueda de Hamburgo. Fuente: Elaboración propia.

Para la fase de consolidación, las mezclas SMA 12,5 presentaron mayor deformación que las mezclas MDC 19. Aunque ambas mezclas tienen igual condición de vacíos $7 \pm 1 \%$ al iniciar el ensayo, las SMA inicialmente no generan el contacto entre agregados que las caracteriza y esto se asocia a la ausencia de partículas de agregados con tamaño intermedio en su granulometría y el alto contenido de asfalto, favoreciendo el desplazamiento de las partículas y generándose deformación acelerada que se estabiliza con el paso de la rueda, una vez las partículas gruesas se empiezan a encontrar y generan la trabazón entre ellas. De lo anterior, se tiene que las pendientes de las mezclas MDC 19 estuvieron alrededor de $47,60 \%$, mientras que las mezclas SMA 12,5 presentaron pendientes de 90% .

Por otro lado, las mezclas MDC 19 al tener un menor contenido de asfalto y una gradación continua, son más estables en la etapa de consolidación, dado que su velocidad de deformación por el paso de la rueda genera menor pendiente. Caso diferente ocurre en mezcla SMA 12,5, dado que la gradación discontinua de las SMA-12,5 se demora más en encontrar los puntos de contacto entre sus partículas más gruesas, aún más cuando se está trabajando con un contenido de vacíos inicial alrededor del 6% .

Adicional, es importante recalcar que el acomodo inicial de las mezclas MDC 19 y SMA 12,5, no determinan el funcionamiento de las mismas durante el resto de tiempo que dure el ensayo. Pues, cada mezcla tiene su particularidad en la composición interna de las mismas.

Durante la fase de deformación plástica, los rangos de pasadas son más extensos para las mezclas SMA 12,5 que para las MDC-19, haciendo que mientras la mezcla MDC-19 está llegando a su punto creep alrededor de las 2800 pasadas en promedio, las mezclas SMA 12,5 continúan en la zona plástica hasta después de las 8000 pasadas.

En relación a los valores de deformación se tiene que las mezclas MDC 19 inician su fase de deformación plástica con menor deformación acumulada que las SMA 12,5, sin embargo, al tener un trayecto corto de esta fase, rápidamente se presenta un punto de inflexión que indica el inicio de la fase de desgranamiento y se acelera su deformación hasta llegar a los límites del ensayo en un numero de pasadas menores que las mezclas SMA 12,5.

Esto se debe a que para las mezclas MDC-19 desde la fase de consolidación empieza a trabajar su esqueleto mineral en conjunto con el asfalto, que sumado con las condiciones del ensayo como lo son la inmersión en agua y la temperatura de 50° C, se acelera el deterioro haciendo que en pocas pasadas lleguen al punto creep, incrementen la pendiente de deformación y mostrando su alta susceptibilidad a la humedad en comparación con las mezclas SMA 12,5.

Por el contrario, las mezclas SMA 12,5 estabilizan su velocidad de deformación en la fase de deformación plástica y continúan el desarrollo del ensayo hasta después de alcanzar el punto creep con pendientes similares entre las fases de cada muestra, generando que a mayor número de pasadas su resistencia a la deformación incremente gradualmente buscando ser constante.

Gracias a la película gruesa de asfalto y filler que se forma en las mezclas SMA 12,5, el punto creep se presenta tardíamente en el desarrollo de la prueba o puede ocurrir que no se presente, lo que las hace poco susceptibles a la humedad y por lo tanto la fase de desgranamiento no es representativa respecto a las mezclas MDC 19.

Finalmente, el análisis entre las mezclas MDC 19 y SMA 12,5 no se debe dar por una comparación de números de pasadas o deformaciones permanentes generadas en el ensayo, sino por un análisis del desempeño que presenta cada una de las mezclas en las diferentes fases del ensayo. Como lo analizado en el presente estudio donde se encontró que las mezclas SMA 12,5 presentan mejor desempeño que las MDC 19, dado que tienen la capacidad de estabilizar las deformaciones una vez empieza a funcionar el contacto piedra a piedra.

4.5. Fase 5: Análisis con tomografía computarizada de la estructura interna de las mezclas asfálticas después de falladas en la rueda de Hamburgo.

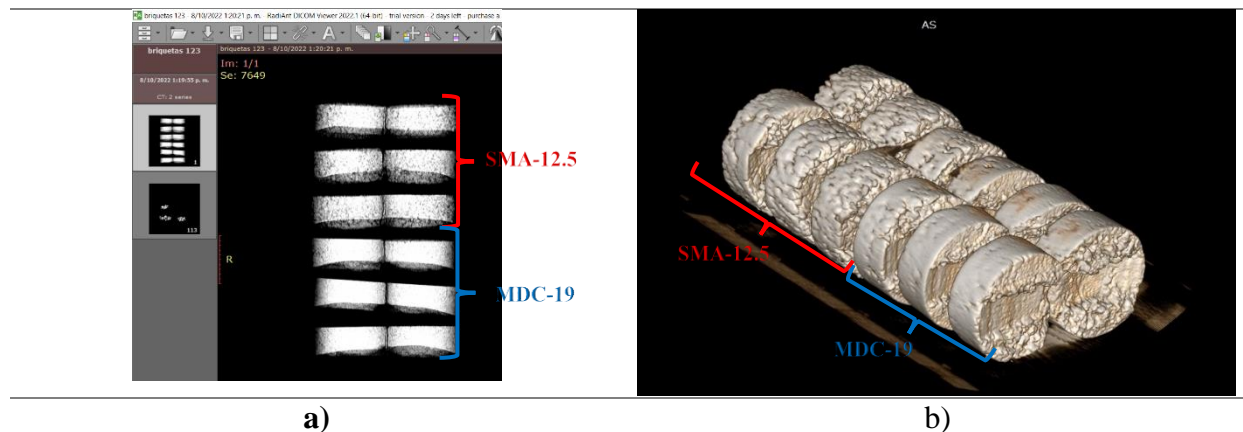
A continuación, se muestran los resultados del procesamiento de imágenes para cada una de las unidades experimentales, donde se presentan los modelos en 2D y 3D con el análisis de la composición de la estructura interna de las mezclas asfálticas después de la prueba de ahuellamiento en la Rueda de Hamburgo.

De igual forma que en la fase 3, donde se desarrolló la tomografía previa a la falla de las unidades experimentales, se tiene que el equipo de tomografía empleado en las muestras

posterior a la Rueda de Hamburgo generó por cada unidad experimental alrededor de 14 imágenes o cortes en la sección transversal. Es decir, que el espesor de la unidad experimental que corresponde a 60 mm es fraccionado cada 4,28 mm aproximadamente y con ayuda del software RadiAnt DICOM Viewer se procesaron las imágenes para obtener los modelos 2D y 3D de las mismas. A continuación, en la **Figura 70** se da a conocer las imágenes y el orden de análisis en el equipo.

Figura 70

Vista en planta y en 3D de las 6 muestras posterior a someterse a falla por ahuellamiento.



Nota: La figura representa en a) la planta en 2D de las parejas de briquetas, las 3 muestras tipo MDC-19 en la parte de abajo y la 3 muestras tipo SMA-12,5 en la parte de arriba. En b) se aprecia el modelo en 3D de las 3 muestras tipo MDC-19 en la parte de adelante y las tres muestras tipo SMA-12,5, en la parte de atrás. Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de las imágenes después de la falla por ahuellamiento se establecieron los mismos parámetros de escala Hounsfield (HU) de las imágenes obtenidas, que se definieron para la evaluación por tomografía antes de la falla por ahuellamiento. Donde la ventana de -1000 HU

a 500 HU se asignó para los vacíos con aire y la ventana de 500 HU a 3095 HU se asignó para los agregados, asfalto y/o fibra celulosa. Los parámetros previamente mencionados se conservaron con el fin de tener una base comparativa.

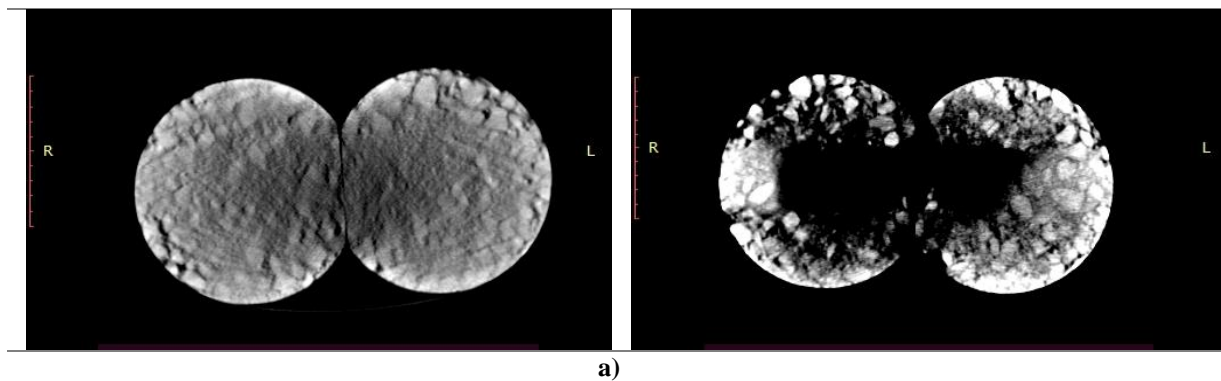
4.5.1. Mezcla Densa en Caliente (MDC 19).

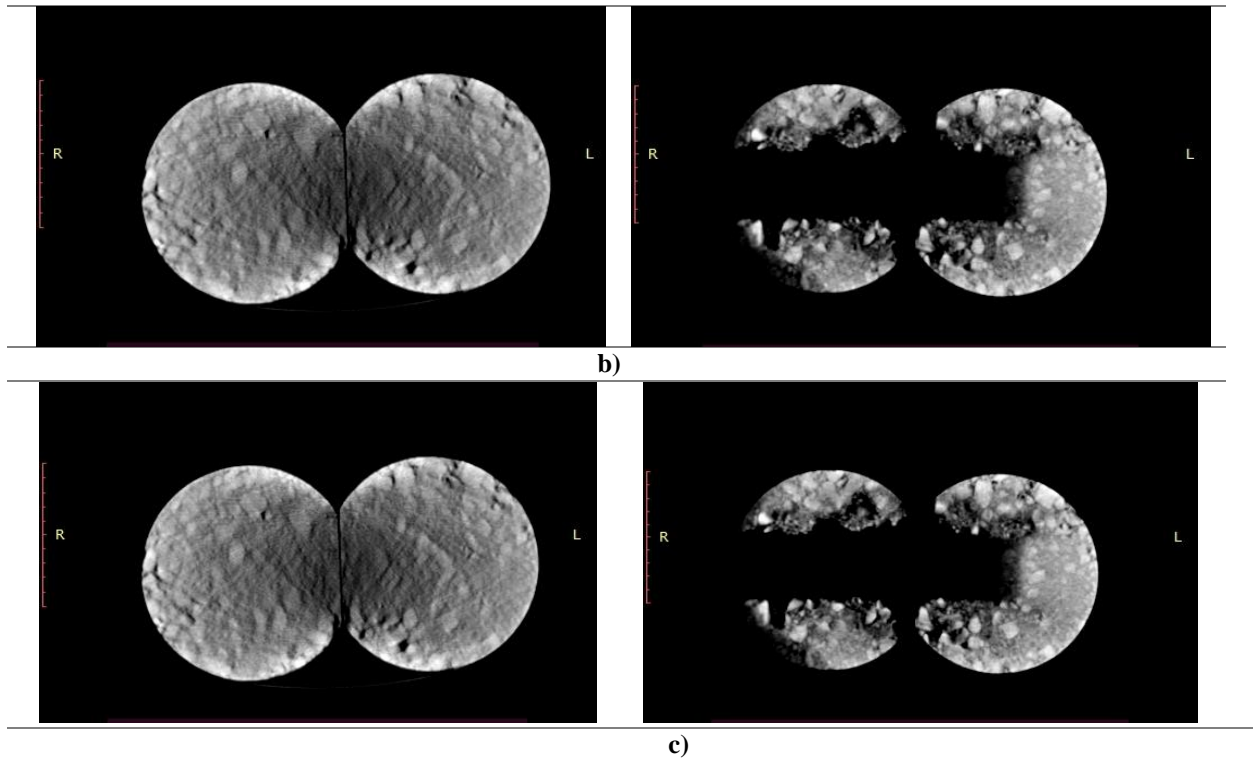
Para apreciar la estructura interna de la mezcla asfáltica MDC 19 después de la falla por ahuellamiento se presentan diferentes vistas, ángulos, y tipos de imágenes obtenidas del software RadiAnt, relacionadas en las figuras **Figura 71**, **Figura 72** y **Figura 73** con el fin de apreciar los elementos y la estructura que componen a las briquetas.

En la **Figura 71** se muestra el resultado del empleo de la ventana personalizada en unidades Hounsfield, asignadas previamente, se pueden observar los cortes transversales de las tres unidades experimentales MDC-19 previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

Figura 71

Muestras MDC 19 en la ventana personalizada unidades Hounsfield posterior al ensayo.





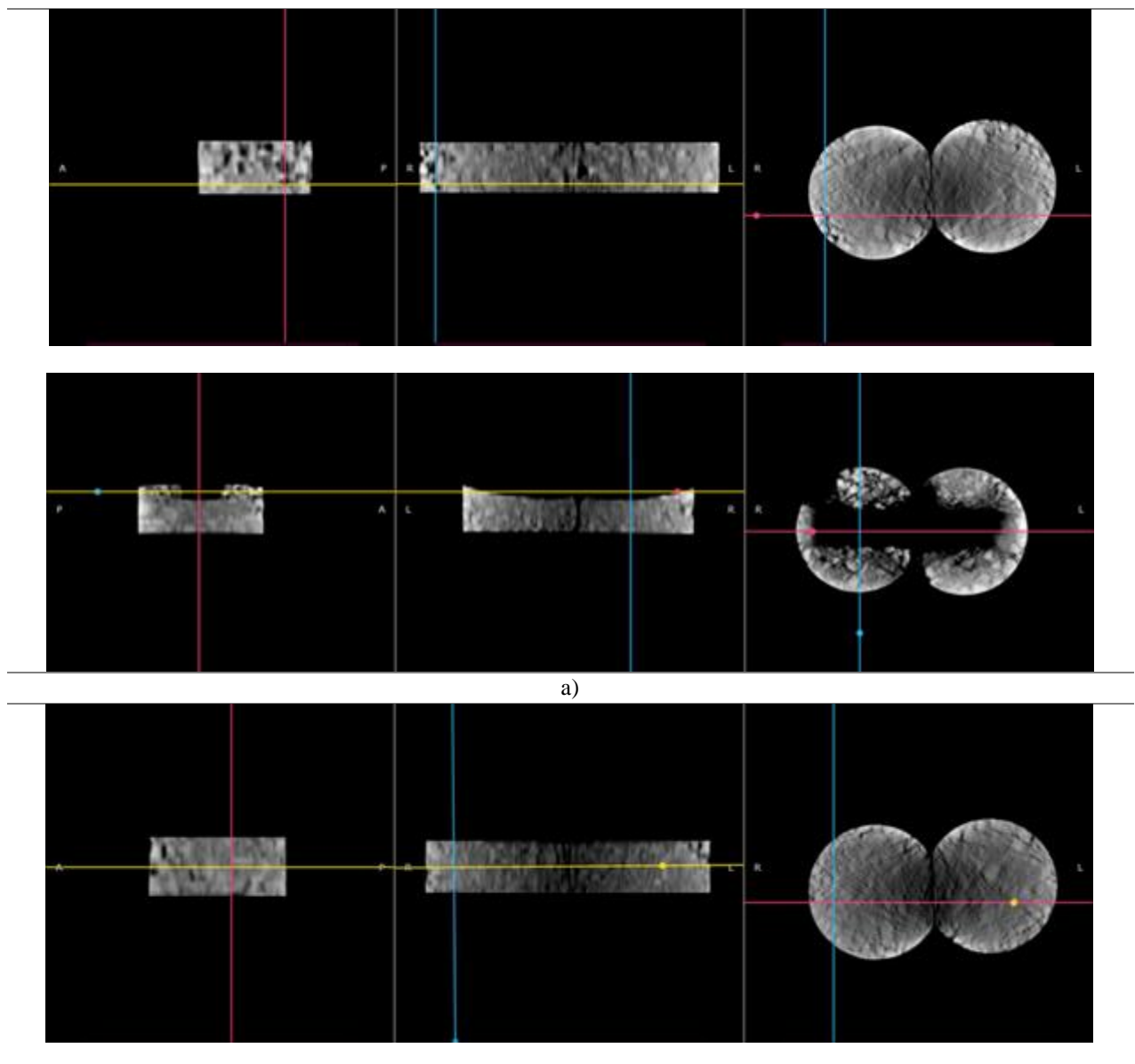
Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental. Fuente: Elaboración propia.

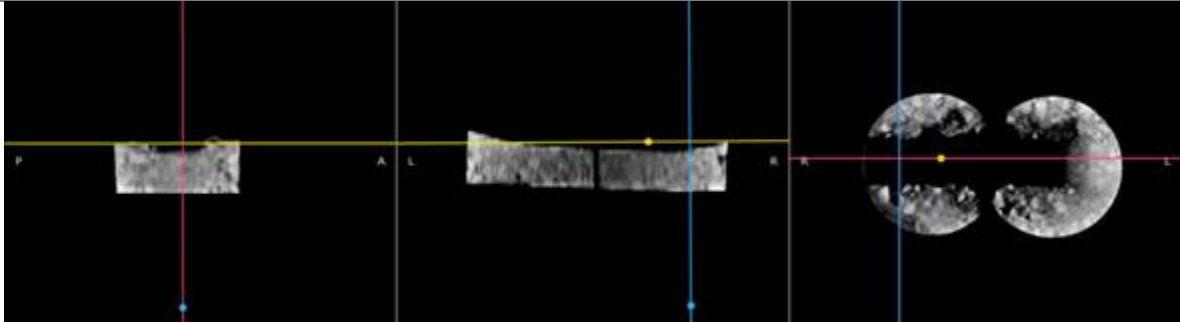
En las imágenes seleccionadas y presentadas en la **Figura 71**, se logran ver las partículas de agregado totalmente definidas en los tonos claros; en tono de grises oscuros, se observa el llenante mineral en su combinación con asfalto y finalmente en color negro, se tienen los vacíos con aire. Se puede observar que la mezcla asfáltica MDC-19 sufrió variaciones en su estructura interna, como lo son la densificación en el área de la huella dejada por el equipo de Rueda de Hamburgo, la concentración de vacíos y pérdida de material en la parte perimetral a la huella causado por el desgranamiento durante la prueba de ahuellamiento y, por tanto, este contorno se aprecia cómo un tono cercano al negro respecto al resto del área de la mezcla.

En la **Figura 72** se presentan los cortes transversales, longitudinales y perpendiculares que muestran diferentes caras a través de la unidad experimental, generados por la reconstrucción multiplanar del software RadiAnt previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

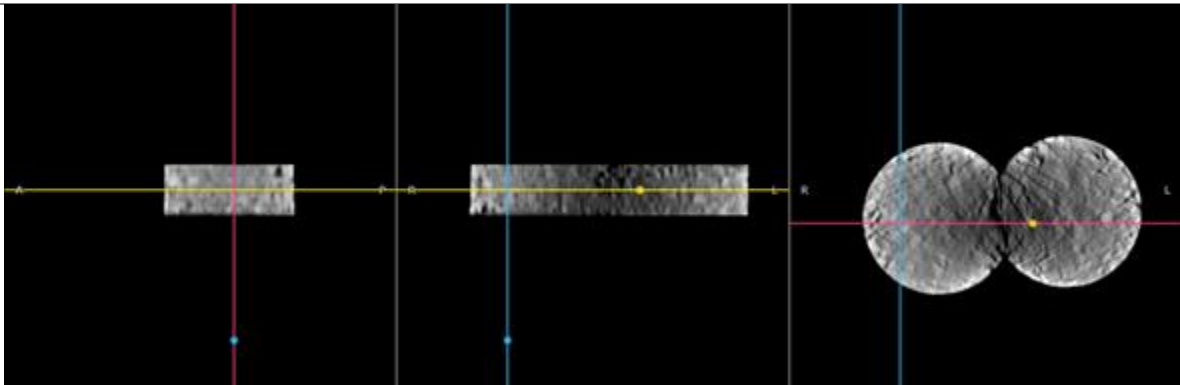
Figura 72

Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas MDC 19 posterior a Rueda de Hamburgo

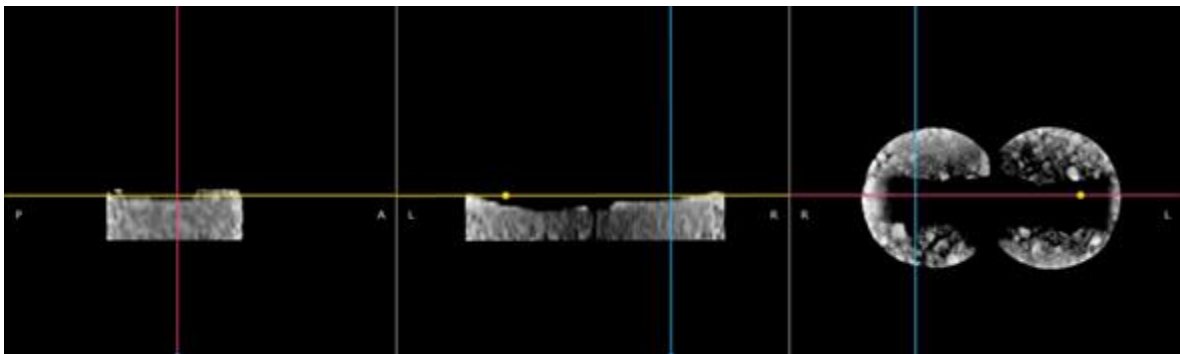




b)



c)



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental.

De la **Figura 72**, se puede observar los tres cortes por los diferentes ejes de las unidades experimentales, generando una vista de la estructura interna de las mismas. En el orden de izquierda → derecha, se tiene que la primera imagen para las tres muestras permite observar que, la estructura interna de las unidades experimentales sufrió una densificación causada por la

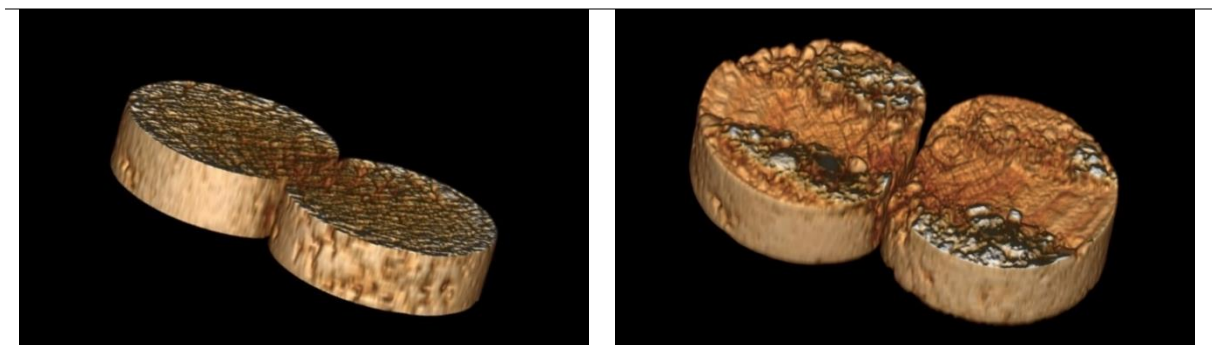
Rueda de Hamburgo, justo en la parte inferior central, lo cual generó un desplazamiento de mastic y vacíos con aire hacia los laterales de la huella, evidenciando mayor concentración de vacíos con aire en la parte superior de las unidades experimentales. Adicional a lo anterior se observa la pérdida de material por desgranamiento en la parte de las crestas generadas en la briqueta.

En las imágenes centrales de las tres unidades experimentales, se tiene que la sección de las dos briquetas que conforman la muestra, genera una figura cóncava, dado que al desarrollarse el ensayo pasando la rueda sobre las muestras, esta genera un impacto constante con el molde que contiene la muestra a fallar y por tanto no permite que la huella que se genera en la parte central sea uniforme a lo largo de toda la unidad experimental.

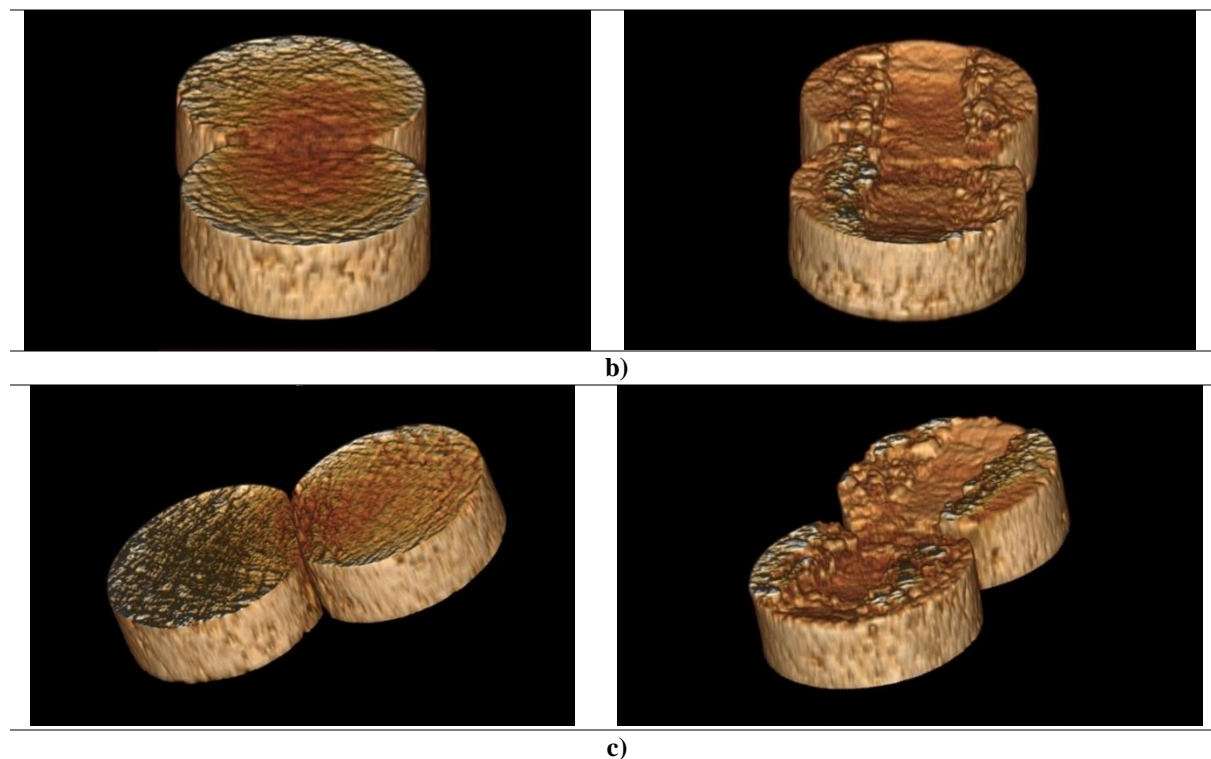
Finalmente, en la **Figura 73** se visualizan las unidades experimentales en el modelo 3D, generado por el software RadiAnt, este nos permite apreciar la estructura superficial de las mismas en las 3 direcciones previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

Figura 73

Modelo 3D Mezclas MDC 19 posterior a ensayo Rueda de Hamburgo.



a)



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos 3D, que se aprecian en la **Figura 73** hacen alusión a la condición real de las muestras, donde el modelo se asemeja a la textura, forma y condición de la unidad experimental después de la prueba de ahuellamiento. En la cara superior, se puede apreciar huella generada por el equipo, así como el desprendimiento de material y una apariencia más porosa que la condición inicial.

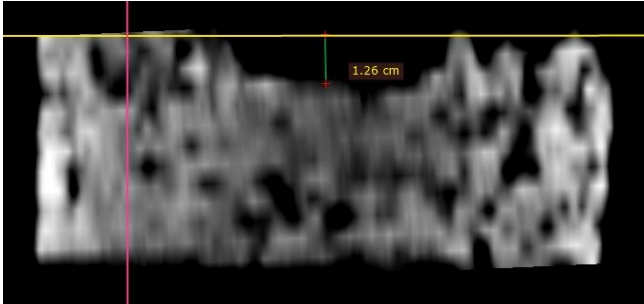
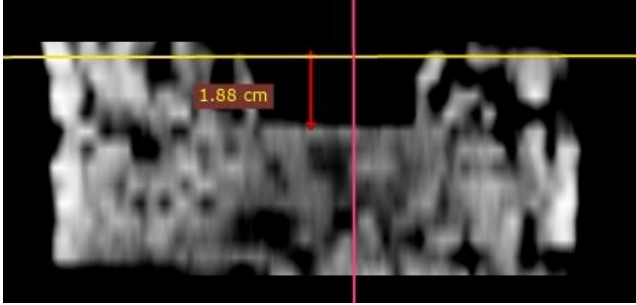
Nuevamente empleando las herramientas del Software RadiAnt, se obtuvo la medida de longitud de la altura final de la huella registradas en las muestras de MDC 19 que, a su vez comparadas con las medidas finales del deformímetro del equipo de Rueda de Hamburgo, se

observó que son valores similares, corroborando que las imágenes generadas por el Tomógrafo son muy acertadas con la condición real de las muestras.

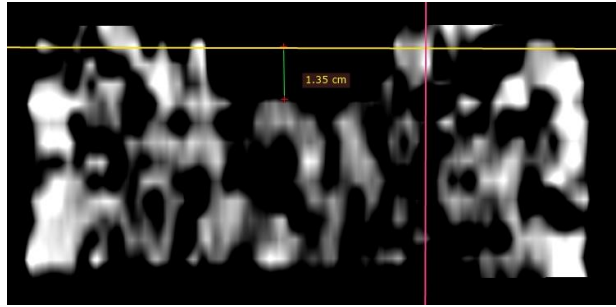
A continuación, en la **Tabla 46** se presentan las medidas de profundidad de huella obtenidas mediante el empleo del tomógrafo y comparadas con los valores arrojados del deformímetro.

Tabla 46.

Mediciones de deformación permanente mesclas MDC 19.

Unidad Experimental	Toma de medida de la huella en el perfil Perpendicular de la muestra.	Deformación permanente Software RadiAnt (cm)	Deformación permanente Rueda de Hamburgo (cm)
1		1,26	1,26
2		1,88	1,88

3



1,35

1,35

Nota: En la tabla se presentan los valores de la altura de la huella generados en la rueda de Hamburgo y medidos en el Software RaiAnt para las mezclas MDC 19. Fuente: Elaboración Propia.

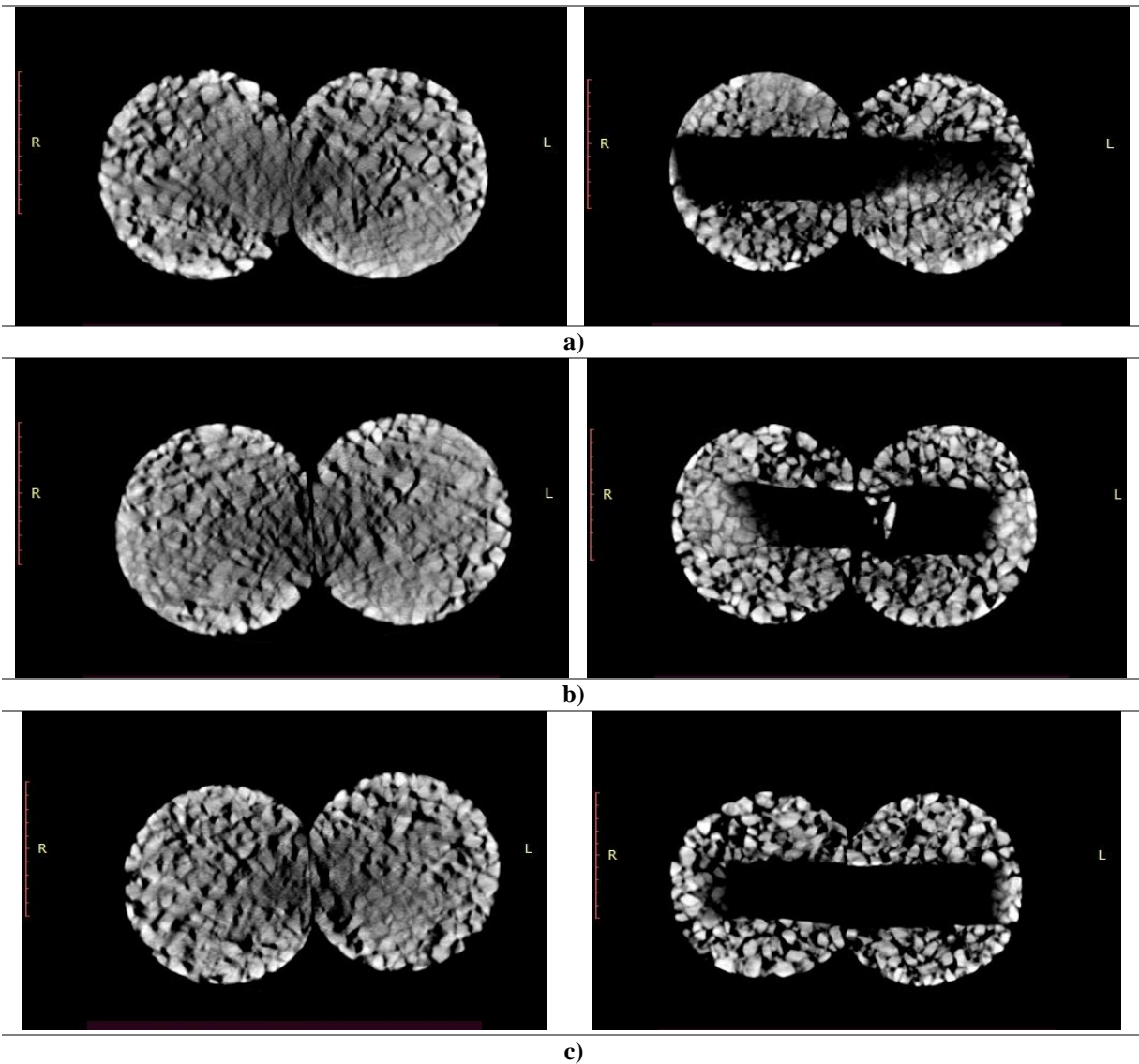
De la **Tabla 46** se tiene que las medidas de altura correspondiente a la deformación de la huella empleando en el software Radiant, son coincidentes con los valores arrojados por el deformímetro del equipo de Rueda de Hamburgo,

4.5.2. Mezcla Stone Mastic Asphalt (SMA 12,5)

Para apreciar la estructura interna de la mezcla asfáltica SMA 12,5 después a la falla se presentan diferentes vistas, ángulos, y tipos de imágenes obtenidas del software RadiAnt, relacionadas en las **figuras** con el fin de apreciar los elementos y la estructura que componen a las briquetas previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

Figura 74

Muestras SMA 12,5 en la ventana personalizada en unidades Hounsfield posterior a ensayo.



Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental.

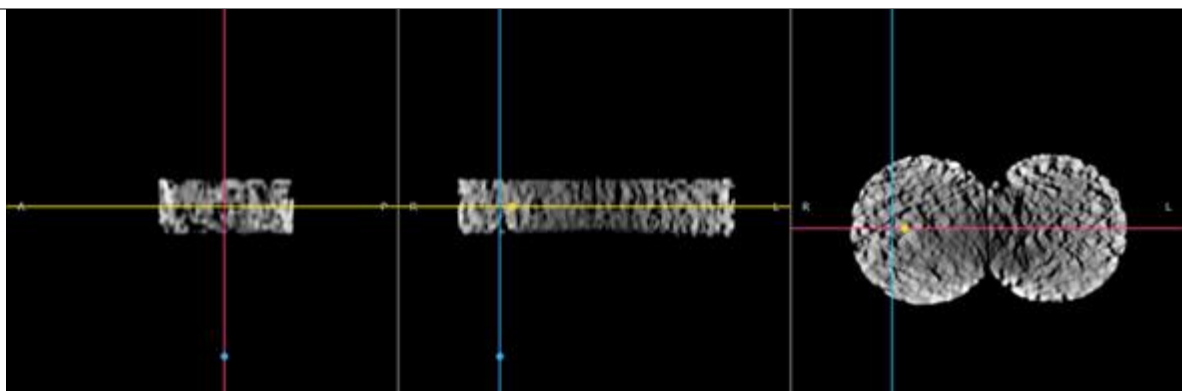
En las imágenes seleccionadas y presentadas en la **Figura 74** se logran ver las partículas de agregado totalmente definidas en los tonos claros; en tono de grises oscuros, se observa el

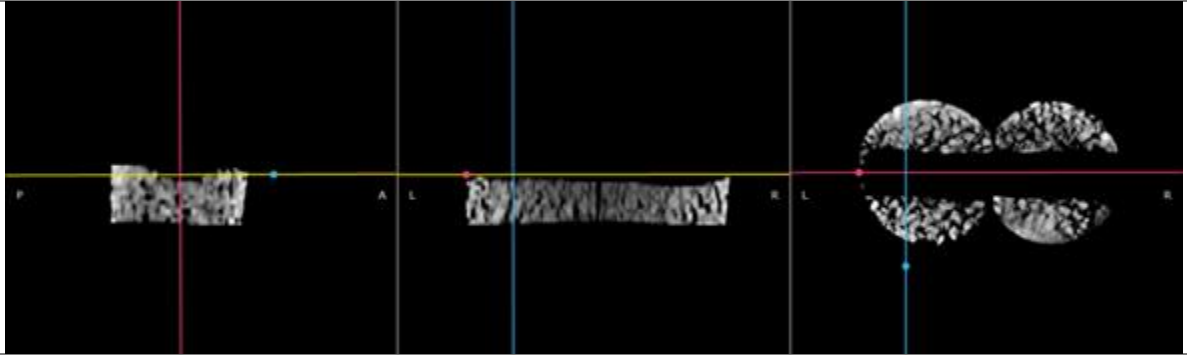
llenante mineral en su combinación con asfalto y finalmente en color negro, se tienen los vacíos con aire. Se puede observar que la mezcla asfáltica SMA-12,5 sufrió variaciones en su estructura interna, como lo son la densificación en el área de la huella dejada por el equipo de Rueda de Hamburgo, un desplazamiento de los vacíos por efecto de la a hulla y pérdida de material en la parte perimetral a la huella causado por el desgranamiento durante la prueba de ahuellamiento. Adicional, para estas unidades experimentales no se presentó pérdida superficial de material por el efecto de desgranamiento.

En la **Figura 75** se presentan los cortes transversales, longitudinales y perpendiculares que muestran diferentes caras a través de la unidad experimental, generados por la reconstrucción multiplanar del software RadiAnt previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

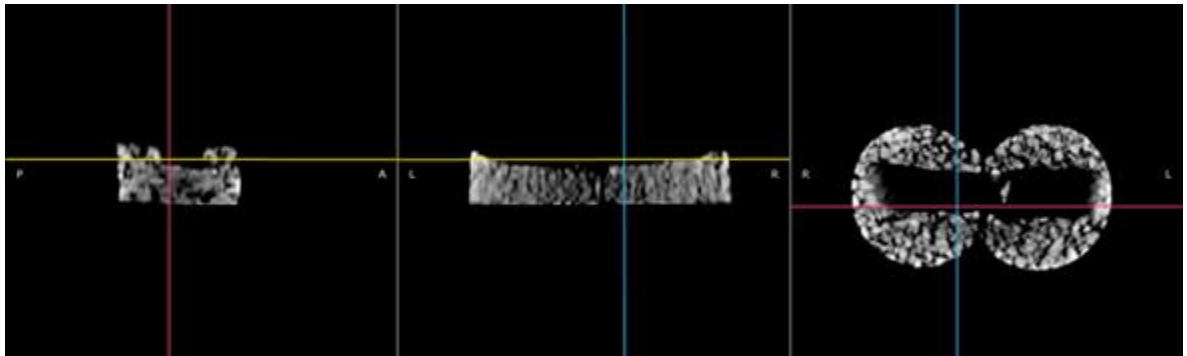
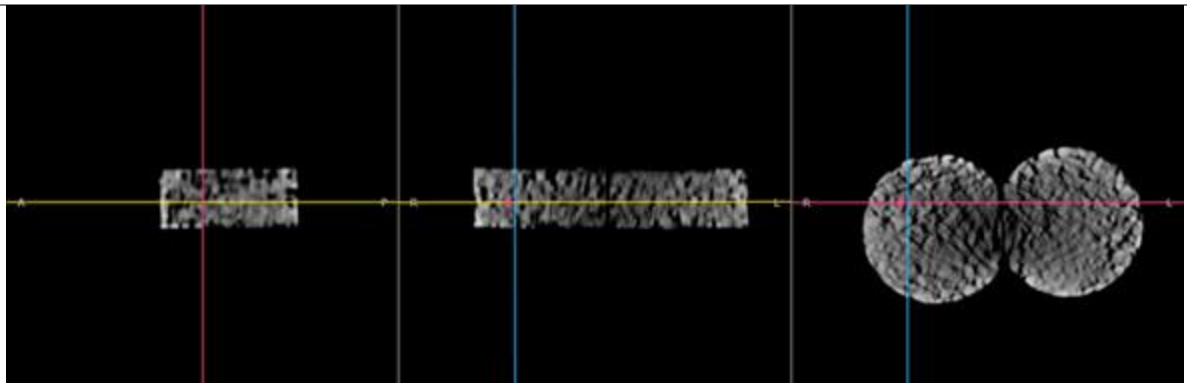
Figura 75

Cortes axiales y longitudinales de la Mezclas SMA 12,5 posterior a Rueda de Hamburgo

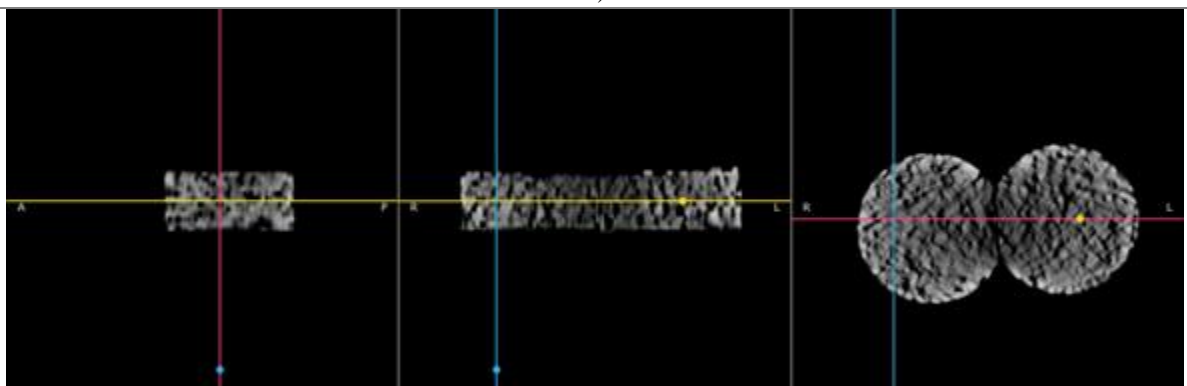


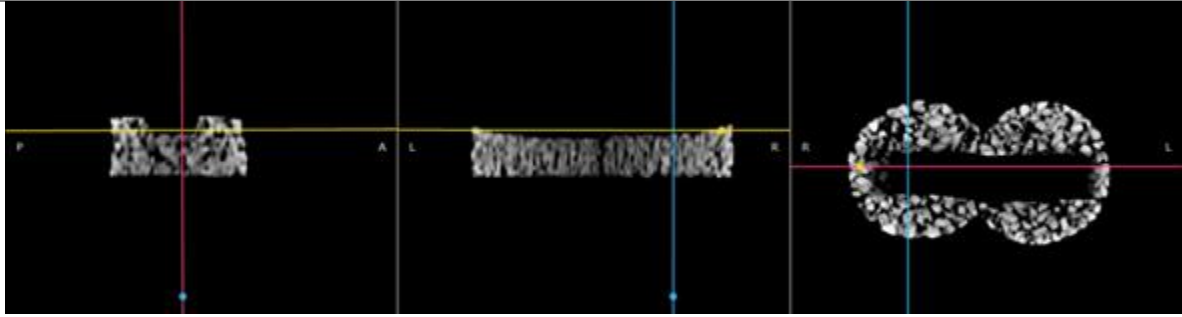


a)



b)





c)

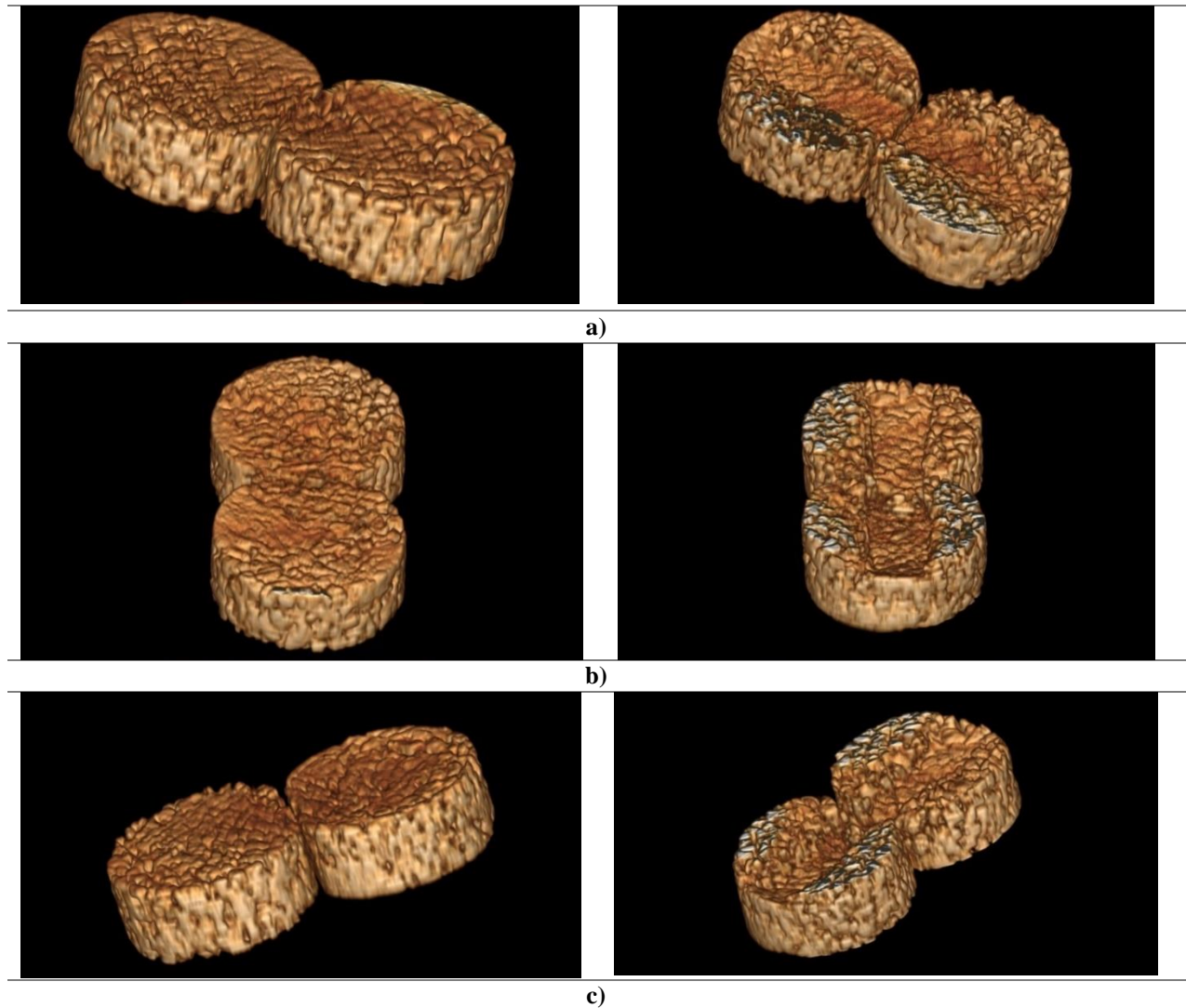
Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

De la **Figura 75**, se puede observar los tres cortes por los diferentes ejes de las unidades experimentales, generando una vista de la estructura interna de las mismas. En el orden de izquierda → derecha, se tiene que la primera imagen para las tres muestras permite observar que, la estructura interna de las unidades experimentales sufrió una densificación causada por la Rueda de Hamburgo, justo en la parte inferior central, lo cual generó un desplazamiento de mastic y vacíos con aire hacia los laterales de la huella, evidenciando mayor concentración de vacíos con aire en la parte superior de las unidades experimentales. Adicional a lo anterior se observa que la mezclas SMA 12,5 no generan la pérdida de material por desgranamiento, dado que estas son de baja susceptibilidad a la mezcla.

Finalmente, en la **Figura 76** se visualizan las unidades experimentales SMA 12,5 en el modelo 3D, generado por el software RadiAnt, este nos permite apreciar la estructura superficial de las unidades experimentales en las 3 direcciones previo y posterior al ensayo Rueda de Hamburgo.

Figura 76

Modelo 3D Mezclas SMA 12,5 posterior a ensayo Rueda de Hamburgo.



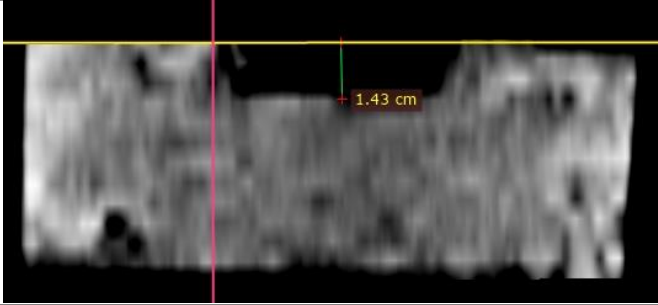
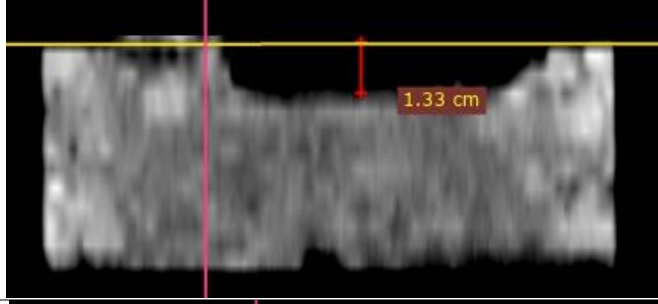
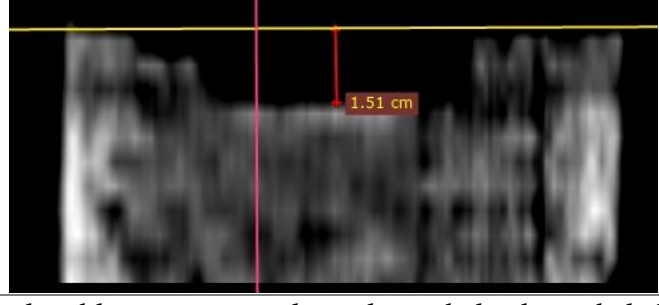
Nota: En la figura se observa a) Unidad experimental 1, b) Unidad experimental 2, y c) Unidad experimental 3. Fuente: Elaboración propia.

Los modelos 3D, que se aprecian en la **Figura 76** hacen alusión a la condición real de las muestras, donde el modelo se asemeja a la textura, forma y condición de la unidad experimental después de la prueba de ahuellamiento, se puede apreciar en la cara superior la huella generada, una apariencia más porosa que la condición inicial y una huella generada con efecto cortante.

A continuación, en la **Tabla 47** se presentan las medidas de profundidad de huella obtenidas mediante el empleo del tomógrafo y comparadas con los valores arrojados del deformímetro.

Tabla 47.

Mediciones de deformación permanente mezclas SMA 12,5.

Unidad Experimental	Toma de medida de la huella en el perfil Perpendicular de la muestra.	Deformación permanente Software RadiAnt (cm)	Deformación permanente Rueda de Hamburgo (cm)
1		1,43	1,43
2		1,33	1,32
3		1,51	1,51

Nota: En la tabla se presentan los valores de la altura de la huella generados en la rueda de Hamburgo y medidos en el Software RaiAnt para las mezclas SMA 12,5. Fuente: Elaboración Propia.

De la **Tabla 47** se tiene que las medidas de altura correspondiente a la deformación de la huella empleando en el software Radiant, son coincidentes con los valores arrojados por el deformímetro del equipo de Rueda de Hamburgo,

4.5.3. Análisis comparativo entre MDC-19 y SMA-12,5 posterior a la prueba Rueda de Hamburgo.

Una vez analizadas las imágenes y modelos obtenidos del proceso de tomografía después de la prueba de Rueda de Hamburgo, se observa que existen diferencias entre la distribución de agregados, asfalto y vacíos con aire en las estructuras internas de las unidades experimentales MDC-19 y SMA-12,5 y que los modelos generados son aproximados a la realidad.

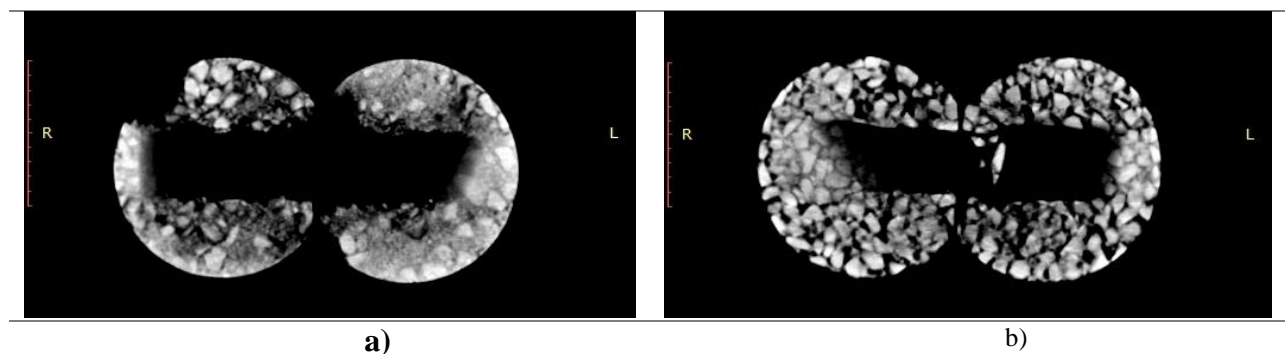
Para el caso de las MDC-19 se generaron cambios significativos en las muestras, donde las imágenes evidencian una densificación de los materiales en la fracción de la mezcla que se encuentra por debajo de la huella, generada por un desplazamiento lateral de la mezcla hacia los bordes alrededor de la huella de la rueda, por lo que la altura de la muestra se vio alterada después de la deformación. A su vez, en la parte superior de la muestra se observa la pérdida de material en la superficie, mostrándose una imagen más porosa y la falta de algunas partículas alrededor de la huella, así como la concentración de vacíos que se ven reflejados en las zonas aledañas a la huella.

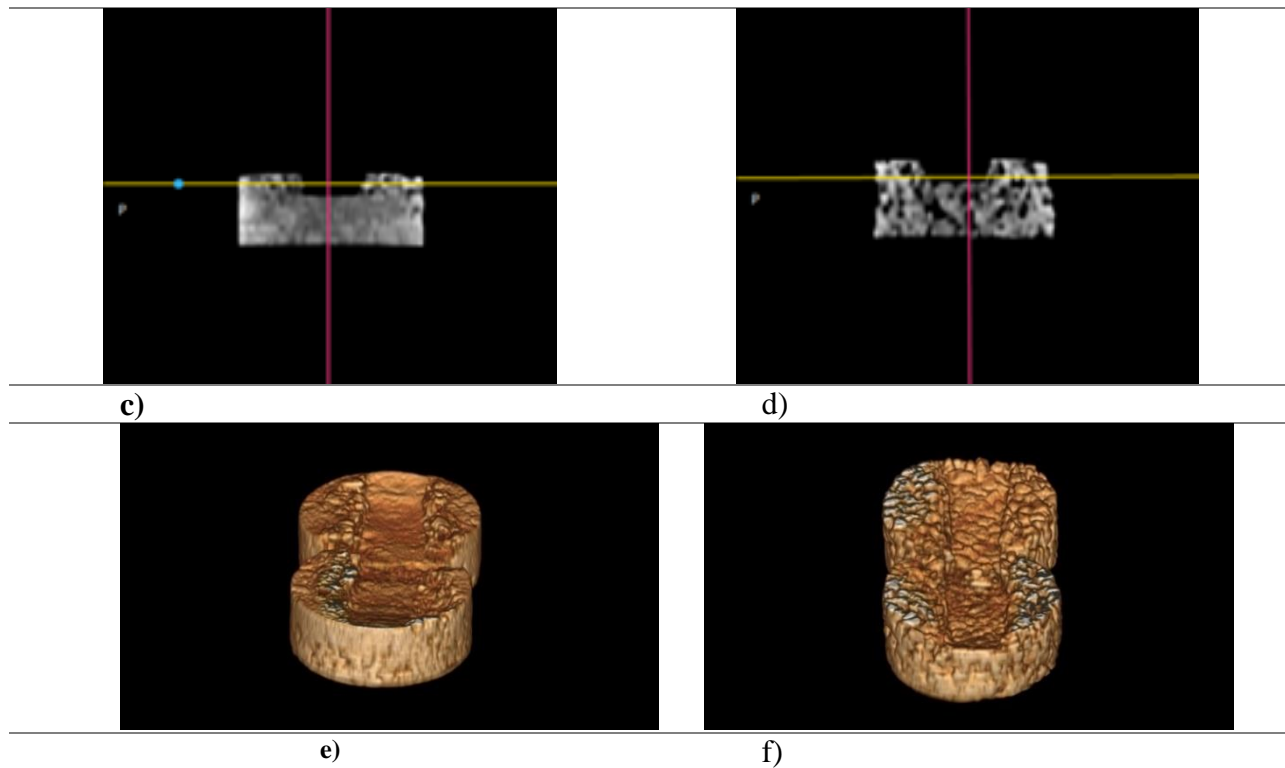
Para las mezclas tipo SMA 12,5 se observa una variación en la estructura interna debido a la prueba de ahuellamiento, se forma una huella en la parte superior de la muestra, pero no se evidencia pérdida de material, haciendo que la geometría de la falla sea más definida, ya que el cortante en la misma presenta caras casi rectas. Al igual que en las MDC-19 se presenta una alteración en la acomodación de los agregados y vacíos, densificándose en el centro las partículas sólidas y desplazando los vacíos hacia los bordes. Así mismo se generó un incremento en la altura lateral de las muestras por el efecto de ahuellamiento, indicando que hubo un punto donde la deformación presento una estabilización al ser soportada por el contacto piedra a piedra que caracteriza este tipo de mezclas asfálticas.

En la **Figura 77** se muestran las imágenes comparativas entre las mezclas asfálticas MDC 19 al costado izquierdo y las SMA 12,5 al lado derecho, donde se pueden observar los cortes transversales, perpendiculares y la vista en 3D.

Figura 77

Mezclas MDC 19 y SMA 12,5 posterior al ensayo de Rueda de Hamburgo





Nota: En la figura se presenta, en a), c) y e) las mezclas MDC 19 ahuelladas en planta, perfil y 3D respectivamente. En b), d) y f) las mezclas SMA 12,5 ahuelladas en planta, perfil y 3D. Fuente: Elaboración propia.

Culminadas todas las fases objeto del presente trabajo, se logra corroborar que la tomografía computarizada Rayos-X en una gran herramienta no destructiva para analizar el comportamiento interno de las mezclas asfálticas, ya que al lograr una correcta calibración del software se puede obtener información de la estructura interna de las mezclas asfálticas, para verificar resultados de compactación, contenidos de vacíos y esfuerzos a los que son sometidos los materiales.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones.

Para el presente estudio se fijaron los parámetros de materiales a emplear, metodología de compactación, temperaturas de ensayo y grados de esfuerzo para ambos tipos de mezcla asfáltica, con el fin de tener punto de comparación, donde se pudo observar que con los materiales empleados en una mezcla asfáltica convencional tipo MDC-19 se puede llegar a cumplir con especificaciones exigidas para las mezcla tipo SMA, así como se puede obtener un material que presenta mejor desempeño ante las deformaciones permanentes. Lo que significa que los materiales que se emplean en la construcción de carreteras en el país pueden ser aptos para continuar con el estudio de las mezclas asfálticas Stone Mastic Asphalt.

Las diferencias analizadas entre las distribuciones granulométricas de cada tipo de mezcla asfáltica permitieron profundizar en la importancia de trabajar con las propiedades de los agregados pétreos para lograr mejores desempeños, teniendo en cuenta que el objetivo debe ir más allá de cumplir con una especificación, y es encontrar el verdadero potencial de los materiales pétreos que se utilizan día a día en la construcción de carreteras.

La metodología de diseño de mezclas asfálticas SMA fue adoptada de la Guía Metodológica de la NAPA, por medio de la cual se logró evaluar los materiales disponibles para el estudio, verificar el cumplimiento de los requisitos de calidad y se aplicaron las metodologías necesarias para cumplir con los criterios de diseño. Se considera, que la misma puede ser una

base para revisar y adaptar a las condiciones del país y así en un futuro obtener una metodología de diseño colombiana para las mezclas SMA.

En el proceso de diseño de una mezcla SMA se debe analizar el comportamiento de las mezclas asfálticas desde las propiedades del esqueleto mineral y volumétricas como factores principales en el criterio de diseño, de tal forma que los materiales que componen la mezcla funcionen acorde al principio de contacto piedra a piedra. Adicional, el asfalto, también debe ser seleccionado cuidadosamente, buscando propiedades que potencien sus características de adherencia y estabilidad garantizando un adecuado cubrimiento del agregado logrando que todos los elementos que componen la mezcla hagan su aporte de resistencia frente a las condiciones de trabajo.

Complementando lo anterior, una alternativa que ha brindado soluciones acertadas a las necesidades y exigencias de los proyectos de infraestructura vial hoy en día son los asfaltos modificados químicamente o combinados con elementos aditivos que mejoran su desempeño en los pavimentos. Tal es caso de las Mezclas SMA, donde el empleo de este tipo de asfalto es necesario para cumplir con exigencias del diseño y funcionalidad de misma en una capa asfáltica.

En el desarrollo del ensayo de Rueda de Hamburgo, se logró llevar a falla por deformación permanente las mezclas MDC 19 y SMA 12,5, haciendo que ambas superaran la condición de máxima deformación delimitada de 12,5 mm para la prueba, cada una a diferente número de pasadas según su desempeño. De esta forma, las mezclas MDC – 19 alcanzaron primero el límite del ensayo en un rango de 4950 a 6325 pasadas. Mientras que las mezclas SMA

12,5 permitieron un mayor número de pasadas, estableciendo su rango entre 7270 y 15900 pasadas para alcanzar los 12,5 mm de profundidad huella.

El análisis de deformación por ahuellamiento entre las mezclas MDC 19 y SMA 12,5 no fue dado por una comparación de números de pasadas o deformaciones permanentes generadas en el ensayo, sino por un análisis del desempeño que presenta cada una de las mezclas en las diferentes fases del ensayo. Donde en el presente estudio donde se encontró que las mezclas SMA 12,5 presentan mejor desempeño que las MDC 19; comprobándose la hipótesis del presente trabajo.

Cabe mencionar, que el hecho de que una mezcla SMA presentó un mejor desempeño que la mezclas MDC al ser comparadas en las condiciones del trabajo desarrollado, no implica que la mezcla MDC no sea funcional en una estructura de pavimento. Por el contrario, la determinación de implementar una mezcla u otra en un proyecto debe ser diseñada y ajustada a las condiciones del mismo y de este modo se obtener la mezcla que mejor se adecue a las necesidades técnicas y económicas del proyecto.

En las mezclas tipo SMA-12,5 se presentó un mejor comportamiento ante los esfuerzos de deformación permanente que en las mezclas tipo MDC-19, puesto que arrojó mejores desempeños en la prueba de ahuellamiento de la Rueda de Hamburgo, soportando un nivel de tránsito simulado mayor al soportado por las mezclas MDC-19, presentando una estabilización en grado de deformación en la medida que aumentaba el número de ciclos de carga, así como un

mejor comportamiento ante la presencia de humedad con un punto creep más alto, de igual forma sufrió menos grado de desgranamiento y pérdidas de partículas una vez finalizado el ensayo.

Las características del equipo de tomografía empleado en este estudio son las de un tomógrafo medicinal, donde se tenía un espesor de toma de imágenes de 4mm, intensidad de rayo de 120 kV y corriente de exposición de 30 mA. Esto comparado con los tomógrafos industriales normalmente empleados en la evaluación de materiales y objetos sólidos, con espesores del orden de 59 micrones, intensidades de rayo de 205kV y corrientes del 0,6 mA que le dan más precisión en la definición de la imagen hacen que el equipo sea considerado un limitante en el estudio de los materiales como las mezclas asfálticas dado que al ser un equipo médico diseñado para evaluar el cuerpo humano, no se requiere intensidades de rayo muy altas, ni espesores de toma muy delgados para lograr imágenes de buena calidad.

Conociendo de antemano que las composiciones de las mezclas MDC 19 y SMA 12,5 difieren notoriamente entre sí, del proceso de análisis por Tomografía Computarizada Rayos-X a la estructura interna de las mismas, en la primera inspección previa a la falla, fue posible observar que existen diferencias entre las distribuciones internas de cada tipo de mezclas asfáltica, teniéndose para las mezclas MDC 19 gradación gruesa y fina equilibrada para obtener la gradación continua característica de este tipo de mezcla, así como un cubrimiento homogéneo del mastic en las partículas y por tanto su condición densa. Mientras que para las mezclas SMA 12,5 se observó la gradación particular de las mismas, el agregado con un alto contenido de partículas gruesas, así como una capa de cubrimiento gruesa homogénea del mastic alrededor de

los agregados generada por el alto contenido de asfalto y una distribución de vacíos que se presenta alrededor de los puntos de entramamiento entre las partículas gruesas.

Del proceso de análisis por Tomografía Computarizada Rayos-X a la estructura interna de las mezclas asfálticas, posterior a la falla, se observó nuevamente que existen diferencias entre las distribuciones internas de cada tipo de mezclas asfáltica y que fueron más notorias en el comportamiento y resultado final después de la falla por ahuellamiento. Para el caso de las mezclas MDC-19 se presenta una densificación en la parte inferior de cada muestra y en la parte superior de las mismas se observa áreas negras que corresponden a vacíos con aire en la zona lateral y superior, también se presenta pérdida de partículas por el stripping, lo cual se observa claramente en las imágenes obtenidas. Por otro lado, las mezclas asfálticas SMA-12,5 se observa una variación en la estructura interna debido a la prueba de ahuellamiento, se forma una huella en la parte superior de la muestra, pero no se evidencia pérdida de material, haciendo que la geometría de la falla sea más definida, al ser más notorio el cortante en la misma

La tomografía computarizada rayos X, es una técnica no destructiva que brinda herramientas para evaluar un elemento de manera cualitativa al tener visualización de su estructura interna sin generar afectación en el mismo, lo cual permite obtener modelos realistas de las distribuciones de sus componentes y en el campo de resistencia de materiales es una herramienta relativamente nueva que ha dado buenos resultados al obtener imágenes que antes solo eran consideraciones teóricas, por lo que se considera que esta herramienta será un elemento indispensable en el área de la ingeniería para la modelación de los materiales en el diseños de las mezclas y también una pieza clave en la auscultación de pavimentos.

5.2. Recomendaciones.

Del presente estudio se proponen temas de investigación relacionados a evaluar la mezcla asfáltica SMA con diferentes fuentes de materiales, granulometrías donde se tengan en cuenta el tránsito y las condiciones a las que son sometidas las mezclas en la vida real para evaluar o determinar con un criterio acertado que estas mezclas son viables como una solución a implementar en las vías colombianas.

Durante el proceso de compactación se considera la importancia de recomendar la disponibilidad de un equipo de compactación giratoria que permita fijar otros parámetros, como la altura final de la briqueta a elaborar, lo que simplificaría los procesos para la elaboración de muestras de acuerdo a los requisitos de cada ensayo desarrollado.

La evaluación de la deformación permanente en el equipo de Rueda de Hamburgo, permite unos resultados de simulación de tráfico que quizá no son los más adecuados para evaluar el comportamiento óptimo de las mezclas asfálticas tipo SMA, por cuanto su desempeño es diferente al de las mezclas asfálticas convencionales, se recomienda como forma de evaluación de desempeño desarrollar análisis más amplios en cuanto a números de muestras y condiciones de ensayo en la Rueda Hamburgo con el fin de establecer los rangos de los ciclos de carga y las deformaciones que pueden alcanzar este tipo de mezclas. Adicional se debe considerar los ensayos a escala real como lo es el ensayo de pista de prueba o un tramo de prueba con tráfico real, con el fin de juzgar mejor su desempeño.

El empleo de la Tomografía Computarizada Rayos X brindó información de valor para la observación de la estructura interna, es importante para otros estudios de este tipo incursionar en la búsqueda de equipos de mejores características técnicas como resolución, capacidad de cortes, software de procesamiento de imágenes, entre otros, pues esto daría la posibilidad de hacer análisis más profundos de los resultados de imágenes y modelos en 3D, tal como se ha logrado en otros países. No obstante, se considera que esta metodología empleada es una gran herramienta que puede facilitar múltiples análisis de los materiales que día a día se requieren en la ingeniería de pavimentos, por lo que se recomiendan líneas de investigación donde se implementen equipos de tomografía de carácter industrial y donde se desarrollen procesamientos de imágenes mediante procesos estadísticos que permitan dar más detalle.

Bibliografía.

- AASHTO. (2008a). *Standar Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)*. R 46.
- AASHTO. (2008b). *Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)*. M 325.
- AASHTO. (2017). *Standard Method of Test for Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Asphalt Mixtures*. T 324.
- Airey, G. D., & Choi, Y. K. (2002). State of the Art Report on Moisture Sensitivity Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *Road Materials and Pavement Design*, 3(4), 355-372. <https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689930>
- Alvarez, A., Arámbula, E., & Caro, S. (2008). Tomografía computarizada con rayos-x y sistema de imágenes de agregados (AIMS) para el estudio de mezclas asfálticas y agregados studying hot mix asphalt and aggregates. *Revista Ingeniería E Investigación*, 28(2), 142-151.
- Álvarez, A., Carvajal, J., Fuentes, L., & Reyes, O. (2013). Principales hallazgos del análisis de la estructura interna de mezclas asfálticas determinada a partir del uso de Tomografía Computarizada de Rayos X. *XIX Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos*. 23-25 Octubre de 2013, October 2015, 5.
- ASTM D 6390. (1997). Standard Method of Test For Determination of Draindown Characteristics In Un-compacted Asphalt Mixtures. *Annual Book of American Society for Testing materiasl ASTM Standards*, 6-8. <https://doi.org/10.1520/D6390-05.2>
- CAF, B. de desarrollo de A. L. (2018). *Construcción de Carreteras Sostenibles* (p. 29).
- Cai, X., Yang, J., Chen, X., Zhang, J., & Zhang, H. (2020). Interlocking property evaluation of dual skeleton in semi-flexible pavement material by micromechanical model and X-ray

- computed tomography. *Construction and Building Materials*, 254.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118934>
- Caro, S., Coral, L., & Caicedo, B. (2003). Modelación del ahuellamiento en mezclas asfálticas de pavimentos. *Revista de Ingeniería*, 0(18), 41-47. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i18.478>
- Chaturabong, P., & Bahia, H. U. (2017). Mechanisms of asphalt mixture rutting in the dry Hamburg Wheel Tracking test and the potential to be alternative test in measuring rutting resistance. *Construction and Building Materials*, 146, 175-182.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.080>
- Ciardullo, S. (2021). *Las 5 Densidades Radiológicas*. 1-13. <https://radiologia2cero.com/5-densidades-radiologicas/>
- Flores, M., Delgado, H., & Gómez, J. A. (2018). *Evaluación del desempeño de mezclas asfálticas con la rueda cargada de Hamburgo*. 568, 1-50.
- Gobernación de Antioquia. (2015). *Inventario de la Red Vial en el Departamento de Antioquia*.
- Gobernación del Cauca. (2018). *Planes viales Municipales : una alternativa de Gestión y Planeación | Gobernación del Cauca Planes viales Municipales : una alternativa de Gestión y Planeación | Gobernación del Cauca Despacho del Gobernador* (<http://cauca.gov.co/despacho-del-gobernador>). 1-2.
- Gobernación Valle del Cauca. (2018). *Arranca el inventario vial en 40 de los 42 municipios del Valle del Cauca*.
<https://www.valledelcauca.gov.co/infraestructura/publicaciones/60771/arranca-el-inventario-vial-en-40-de-los-42-municipios-del-valle-del-cauca/>
- Hafeez, I., Kamal, M. A., & Mirza, M. W. (2014). Assessing rutting potential of stone mastic asphalt using wheel tracker and dynamic modulus testing. *the Baltic Journal of Road and*

Bridge Engineering, 9, 325-332. <https://doi.org/10.3846/bjrbe.2014.39>

- Invias. (2012a). INV E – 218 – 13 RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN DE LOS AGREGADOS DE TAMAÑOS MENORES DE 37.5 mm (1½") POR MEDIO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012b). INV E – 220 – 13 SOLIDEZ DE LOS AGREGADOS FRENTE A LA ACCIÓN DE SOLUCIONES DE SULFATO DE SODIO O DE MAGNESIO. En *Invias* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012c). INV E – 238 – 13 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL AGREGADO GRUESO A LA DEGRADACIÓN POR ABRASIÓN, UTILIZANDO EL APARATO MICRO-DEVAL. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012d). INV E – 704 – 13 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN LOS MATERIALES BITUMINOSOS POR DESTILACIÓN. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012e). INV E – 706 – 13 PENETRACIÓN DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS. *Normas de ensayo de materiales para carreteras.*
- Invias. (2012f). INV E – 709 – 13 PUNTOS DE INFLAMACIÓN Y DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA COPA ABIERTA CLEVELAND. *Normas de ensayo de materiales para carreteras.*
- Invias. (2012g). INV E – 712 – 13 PUNTO DE ABLANDAMIENTO DE MATERIALES BITUMINOSOS (APARATO DE ANILLO Y BOLA). En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).

- Invias. (2012h). INV E – 713 – 13 SOLUBILIDAD DE MATERIALES ASFÁLTICOS EN TRICLOROETILENO. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012i). INV E – 716 – 13 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO VISCOSÍMETROS CAPILARES DE VACÍO. *Normas de ensayo de materiales para carreteras, Cd, 50-150.*
- Invias. (2012j). INV E – 718 – 13 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE PARAFINAS EN LIGANTES ASFÁLTICOS. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (pp. 1-6).
- Invias. (2012k). INV E – 724 – 13 ÍNDICE DE PENETRACIÓN DE LOS CEMENTOS ASFÁLTICOS. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2012l). INV E 702 - 13 DUCTILIDAD DE LOS MATERIALES ASFÁLTICOS. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (pp. 1-7).
- Invias. (2012m). *PORCENTAJE DE PARTÍCULAS FRACTURADAS EN UN AGREGADO GRUESO* (pp. 1-7). <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-227-13.pdf>
- Invias. (2013a). Capítulo 4 – Pavimentos Asfálticos. En *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2013* (Número 450, pp. 1-47).
- Invias. (2013b). *INV E-217-13 DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.*
- Invias. (2013c). *INV E - 731 - 13 TOMA DE MUESTRAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS.*
- Invias. (2013d). INV E – 223 – 13 DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD

- ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO. En *Normas de ensayo de materiales para carreteras* (pp. 1-20).
- Invias. (2013e). INV E – 239 – 13 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE VACÍOS EN AGREGADOS FINOS NO COMPACTADOS (INFLUENCIADO POR LA FORMA DE LAS PARTÍCULAS, LA TEXTURA SUPERFICIAL Y LA GRANULOMETRÍA). En *Invias* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2013f). INV E – 717 – 13 DETERMINACIÓN DE LA VISCOSIDAD DEL ASFALTO EMPLEANDO UN VISCOSÍMETRO ROTACIONAL. *Normas de ensayo de materiales para carreteras*, 1-7.
- Invias. (2013g). INV E – 725 – 13 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA. 1-13.
- Invias. (2013h). INV E – 733 – 13 GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK Y DENSIDAD DE MEZCLAS ASFÁLTICAS COMPACTADAS NO ABSORBENTES EMPLEANDO ESPECÍMENES SATURADOS Y SUPERFICIALMENTE SECOS. En *Invias* (pp. 1-8).
- Invias. (2013i). INV E – 735 – 13 GRAVEDAD ESPECÍFICA MÁXIMA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS PARA PAVIMENTOS. En *Invias* (Número Cd, pp. 50-150).
- Invias. (2013j). INV E – 748 – 13 ESTABILIDAD Y FLUJO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE EMPLEANDO EL EQUIPO MARSHALL. *Invias, Cd*, 50-150.
- Jin, C., Feng, Y., Yang, X., Liu, P., Ding, Z., & Oeser, M. (2022). Virtual design of asphalt mixtures using a growth and contact model based on realistic aggregates. *Construction and Building Materials*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126322>
- Joubert, P., Gounder, L., & Van Wy, S. (2004). EXPERIMENTAL ASPHALT SECTIONS IN

THE RUNWAY TOUCH DOWN ZONE ON JOHANNESBURG INTERNATIONAL AIRPORT. *Proceedings of the 8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA '04)*, September, 31-42.

Li, T., Liu, P., Du, C., Schnittcher, M., Hu, J., Wang, D., & Oeser, M. (2022). Microstructural analysis of the effects of compaction on fatigue properties of asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering*, 23(1), 9-20.

<https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1728532>

Liu, P., Hu, J., Wang, D., Oeser, M., Alber, S., Ressel, W., & Canon Falla, G. (2017a). Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior. *Construction and Building Materials*, 133, 196-208.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.041>

Liu, P., Hu, J., Wang, D., Oeser, M., Alber, S., Ressel, W., & Canon Falla, G. (2017b). Modelling and evaluation of aggregate morphology on asphalt compression behavior. *Construction and Building Materials*, 133, 196-208.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.041>

Manuel, H., Miranda, B., Batista, F. A., Lurdes, M. De, & Neves, J. (2020). Influence of laboratory aggregate compaction method on the particle packing of stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials*, 259, 119699.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119699>

Masad, E., Jandhyala, V. K., Dasgupta, N., Somadevan, N., & Shashidhar, N. (2002). Characterization of Air Void Distribution in Asphalt Mixes using X-ray Computed Tomography. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(2), 122-129.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:2\(122\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:2(122))

- Ministerio de Transporte de Colombia. (2021). *Transporte en Cifras 2021 - Anuario Nacional de Transporte*. 1-122. [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/transporte en cifras/Transporte en Cifras 2021 Version 19 julio.pdf?ver=2022-07-22-160700-850%0Ahttp://www.mintransporte.gov.co/](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/transporte%20en%20cifras/Transporte%20en%20Cifras%202021%20Version%2019%20julio.pdf?ver=2022-07-22-160700-850%0Ahttp://www.mintransporte.gov.co/)
- NAPA. (2002). Designing and Constructing SMA Mixtures -State-of-the-Practice. En *Quality Improvement Series 122* (pp. 1-57).
- Nikolaides, A. (2000). Rutting and volumetric properties of SMA mixtures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, 141(3), 135-141.
<https://doi.org/10.1680/tran.2000.141.3.135>
- Obert, S. (2000). *Predicting the performance of stone mastic asphalt* (pp. 1-9).
- Onifade, I., Jelagin, D., Guarin, A., Birgisson, B., & Kringos, N. (2013). *Asphalt Internal Structure Characterization with X-Ray Computed Tomography and Digital Image Processing*. 139-158. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6878-9>
- Pakholak, R., Plewa, A., & Gardziejczyk, W. (2021). Influence of type of modified binder on stiffness and rutting resistance of low-noise asphalt mixtures. *Materials*, 14(11).
<https://doi.org/10.3390/ma14112884>
- Ramirez, J. C., Clavijo, C. A., & Mccollough, C. H. (2008). Tomografía computarizada por rayos X : fundamentos y actualidad. *Revista Ingeniería Biomédica*, 2(4), 54-72.
[http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tomograf a+computarizada+por+rayos+X+:+fundamentos+y+actualidad#0](http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Tomograf%20a+computarizada+por+rayos+X+:+fundamentos+y+actualidad#0)
- Reyes, O., & Camacho, J. (2008). *Influencia de la granulometría en la resistencia al ahuellamiento de mezclas asfálticas*. 18.
- Reyes Ortiz, O. J., Reyes Lizcano, F. A., & Troncoso Rivera, J. R. (2006). Efecto de la presión

de contacto y la temperatura en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica. *Ingeniería y Universidad*, 10(1), 9-18.

Rondón, H., Reyes, F., González, L., & Vásquez, S. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*.

Senior, V., Graciano, C., Vega-posada, C. A., & Lammardo, A. (2014). *XX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos Análisis y caracterización de una mezcla asfáltica , obtenida con mecanismos diferentes de compactación , a través de la técnica de tomografía computarizada CT .* 1-11.

Silva Friderichsen, J. (2015). *Estudios de innovación tecnológica determinación de grado de desempeño PG en cementos asfálticos*.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi-x->

[CHkbbuAhVDuVkkHYAYBAoQFjABegQIARAC&url=http%3A%2F%2Fwww.vialidad.cl%2Fareasdevialidad%2Flaboratorionacional%2FMaterialCursos%2Fasfaltosuperpave%252020150514%2520M](http://www.vialidad.cl/Fareasdevialidad/Flaboratorionacional/FMaterialCursos/Fasfaltosuperpave/2020150514/2520M)

Suyama, D., & Jones, J. (2014). Radiology for students (curriculum). *Radiopaedia.org*, 1-11.

<https://doi.org/10.53347/rid-29252>

Tashman, L., Masad, E., D'Angelo, J., Jhon, B., & Thomas Harman. (2002). X-ray Tomography to Characterize Air Void Distribution in Superpave Gyrotory Compacted Specimens

LAITH. *International Journal of Pavement Engineering*, 3(1), 29-34.

<https://doi.org/10.1080/10298430290029902>

USAID. (2016). *Guía práctica para elaboración de inventarios de vías terciarias* (Programa de Gobernabilidad Regional (ed.)).

Wellmann, W. (2005). *Diseño Y Construcción De Mezclas Asfálticas Tipo Sma*. 63.

Wu, W., Li, Z., Zhang, X., & Li, M. (2018). Evaluating RLWT Rutting Test of Asphalt Mixtures Based on Industrial Computerized Tomography. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 10. <https://doi.org/10.1155/2018/6827064>

Zegarra, J. E. (2017). *TIPO SMA PARA PAVIMENTOS DE ALTO VOLUMEN DE TRÁFICO EN EL PERÚ* ”.