Maestría en Ingeniería Civil

Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado.

Andrés Felipe Ortiz Aristizábal

Bogotá, D.C., 07 de abril de 2021

Escuela Colombiana de Ingeniería
Julio Garavito

Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en geotecnia.

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Directora

Bogotá, D.C., 07 de abril de 2021

Escuela Colombiana de Ingeniería
Julio Garavito

La tesis de maestría titulada «Evaluación del impacto del uso de RAP en las propiedades de mezclas asfálticas tibias con tecnología de espumado», presentada por Andrés Felipe Ortiz Aristizábal, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en geotecnia.

Directora de la tesis

Sandra Ximena Campagnoli Martínez

Jurado

Fernando Estrada Sánchez

Jurado

Oscar Reyes Ortiz

Agradecimientos

A Floresmiro Ortiz Sánchez y Enilse Aristizábal Aguirre, quienes con su apoyo y amor han hecho posible transitar por el camino de la vida, acompañándome en cada momento, buscando siempre lo mejor para mí y dejándome claro que nunca estoy solo.

A la ingeniera Sandra Ximena Campagnoli Martínez, puesto que sin su ardua labor como directora del trabajo de grado no habría sido posible el desarrollo, no solo del presente documento, sino de parte importante de mi formación como profesional en el campo de la ingeniera que más me apasiona, las vías.

Al ingeniero Juan Gabriel Cisneros Llanos, puesto que siempre estuvo dispuesto a ofrecer su colaboración y constantemente mostró interés en que llevase a cabo de manera exitosa, mi desarrollo a nivel personal y profesional.

Al personal de la Escuela Colombiana de Ingeniería Marco Contreras, Osmar Tolosa y en especial a Leonardo Tejedor, puesto que siempre ofrecieron su ayuda y asesoría en los momentos en los que así lo requería.

A la «Compañía de Trabajos Urbanos S.A.S» por haber suministrado el material necesario para la realización de la investigación y a la Escuela Colombiana de Ingeniería quienes me apoyaron con los equipos requeridos para los respectivos ensayos que dieron forma al trabajo presentado.

Resumen

Los procesos de «fresado» se hacen de manera rutinaria en las actividades asociadas al mantenimiento de vías que cuentan con una capa de rodadura de concreto asfáltico. Este proceso deja como «material de residuo» todo el concreto asfáltico retirado o RAP por sus siglas en inglés (Reclaimed Asphalt Pavement), el cual en países como Estados Unidos se ha venido reutilizando desde 1996, llegando al punto de poder ser utilizado en la elaboración de nuevas mezclas asfáltica que cumplan con las especificaciones y las propiedades exigidas para conformar capas asfálticas en una estructura de un pavimento nuevo o rehabilitado. Sin embargo, esta no es una práctica común en Colombia, en donde en el mejor de los casos se utiliza este material para la conformación de bases estabilizadas o de manera más sistemática para mezclas asfálticas frías en capas de relleno, reduciendo considerablemente los beneficios medioambientales y económicos que se podrían obtener al hacer uso de este material en capas de base asfáltica o de rodadura de la estructura de pavimento.

Con el objetivo principal de determinar el efecto que tiene el RAP en las mezclas asfálticas y basándose en metodologías de investigaciones realizadas en países que se encuentran a la vanguardia en el aprovechamiento del RAP, se procedió a realizar mezclas asfálticas tibias con espumado a las cuales se les agregaron diferentes cantidades de RAP, partiendo del 40% que corresponde al máximo permitido por el ARTÍCULO 462 del capítulo 4 de la normativa INVIAS y superando este umbral, particularmente en concentraciones del 50% y 60%.

El comportamiento expuesto por estas mezclas frente a los esfuerzos de tracción indirecta y susceptibilidad a la humedad fue comparado con el desempeño presentado por una mezcla tibia con espumado sin RAP y el de una mezcla caliente tradicional.

Los ensayos realizados se centraron en comprobar el contenido de asfalto óptimo sugerido por el proveedor de las mezclas asfálticas, mediante pruebas de estabilidad/flujo. Una vez se comprobó el cumplimiento de los valores de estabilidad y flujo, así como de vacíos con aire de la mezcla, se procedió a caracterizar el RAP obtenido, determinando la granulometría que aportan sus agregados y la cantidad y

proporción de agregados vírgenes que se debían adicionar para cumplir con la franja granulométrica de una mezcla MDC-19.

Los agregados vírgenes junto con el RAP fueron calentados a las temperaturas propuestas para estimar su compactabilidad mediante el parámetro «N92», que corresponde a la cantidad de giros que debe realizar el «Superpave Giratory Compactor» (SGC) para que la mezcla alcance el 92% de su gravedad específica máxima (Gmm). Esto significa que, a mayor cantidad de giros requeridos por el SGC, la compactabilidad de la mezcla es menor, puesto que se requiere de un esfuerzo mayor para lograr que la mezcla alcance la densidad deseada.

Una vez determinadas las temperaturas de mezcla y compactación, así como el contenido de asfalto y granulometría de la mezcla, se procedió con la elaboración y compactación de las tres (3) briquetas necesarias para cada ensayo (tracción indirecta en condición seca y húmeda). Todos los ensayos se realizaron para los 5 tipos de mezclas propuestos, a saber, una mezcla caliente de control **(MC)**, una mezcla tibia con espumado **(MT)**, una mezcla tibia con espumado y 40% de RAP **(MT40)**, una mezcla tibia con espumado y 50% de RAP **(MT50)** y por último una mezcla tibia con espumado y 60% de RAP **(MT60).** Todas las mezclas tibias anteriormente mencionadas fueron fabricadas con las condiciones de temperatura y concentración de agua establecidas como óptimas para la elaboración de la espuma de asfalto, y con la temperatura de agregados determinada como la más adecuada en los ensayos de compactabilidad.

Posteriormente se planteó la elaboración de mezclas tibias con espumado compactadas a una temperatura de agregados inferior, conservando los parámetros establecidos para la espuma de asfalto, estas mezclas incluyeron 50% de RAP **(MT50-135)** y 60% de RAP **(MT60-135)**. Todas las mezclas mencionadas anteriormente, con una granulometría que cumpla con los valores promedio estipulados en la especificación INVIAS para una mezcla tipo MDC-19, aclarando que existe cierta incertidumbre en la granulometría dada la variabilidad del RAP. Así mismo, los ensayos planteados con miras a determinar la resistencia a la tensión indirecta y susceptibilidad a la humedad de las mezclas analizadas (INV-E-725-13 – «Evaluación de la susceptibilidad a agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta»), fueron realizados

cumpliendo con los periodos, procedimientos y temperaturas de acondicionamiento establecidos en su respectiva norma de ensayo INVIAS.

Al lograr reducir las temperaturas de calentamiento de los agregados entre 20°C y 40°C para la fabricación de las mezclas tibias con espumado en comparación con la mezcla caliente tradicional, según Dinis-Almeida & Afonso (2015) se consigue ahorrar entre 1 y 2 litros de combustible por tonelada de concreto asfáltico fabricado, esto se traduce en una disminución de entre 2 a 7 kg CO_2 que dejan de trasladarse a la atmósfera. Por otro lado, es importante tener en cuenta que, según Zaumanis et al. (2016), la utilización de contenidos de RAP comprendidos entre 40% y 60% representan un ahorro de alrededor de 15 a 30 dólares por tonelada de mezcla fabricada, así mismo, según Lyubarskaya et al. (2017), la inclusión de por lo menos 40% de RAP en las mezclas asfálticas se traduce en un ahorro de 6.8 dólares por tonelada de asfalto en los costos de rehabilitación de la capa de rodadura.

La mezcla tibia con espumado y mayor contenido de RAP (60%) presentó la menor susceptibilidad a la humedad, alcanzando un valor de TSR igual al 89%, muy similar a los de las mezcla tibia con 50% de RAP (TSR 87%) y superando ampliamente al de la mezcla caliente de control (TSR82%). Por otro lado, la mezcla caliente de control fue la que mayor cantidad de trabajo requirió para llegar al fallo requiriendo 1992 kgxmm, superando a la mezcla tibia con 60% de RAP (1737 kgxmm) y a la mezcla tibia con 50% de RAP (1553 kgxmm), destacando que, si bien las mezclas con mayor contenido de RAP soportaron esfuerzos máximos mayores, exhibieron una mayor rigidez y menor capacidad de deformación antes del fallo. La mezcla tibia con espumado y sin RAP tuvo el más bajo desempeño en todos los parámetros evaluados.

Al reducir la temperatura de elaboración de las mezclas tibias con espumado y RAP se redujo considerablemente su desempeño a nivel general, generando incumplimiento en los valores de susceptibilidad al agua requeridos por la normativa aplicable, esto estableció un límite inferior en la temperatura de fabricación de estas mezclas para la presente investigación, puesto que al utilizar una temperatura de calentamiento de agregados inferior a 140°C, las resistencias tanto a la tensión indirecta de las mezclas fabricadas, se redujo entre un 16% y 20% en condición seca y de 29% a 32% en condición húmeda.

Finalmente, con los resultados del estudio se puede considerar la elaboración de mezclas asfálticas tibias con espumado y concentraciones de RAP superiores al 60%, evaluando aspectos tales como su resistencia a la fatiga y la reducción de costos en las labores de fabricación y compactación de las mezclas, determinando así el beneficio económico neto, puesto que como se pudo observar, las mezclas con RAP presentan menor resistencia la fatiga y compactabilidad, en comparación con una mezcla caliente tradicional.

Palabras clave: RAP, asfalto espumado, mezclas tibias, susceptibilidad a la humedad, tracción indirecta.

Índice general

Contenido

Agradecimientos 4
Resumen 5
Índice general 9
Índice de tablas 11
Índice de figuras 15
Índice de anexos 19
1.1. RAP - Reclaimed Asphalt Pavement, en Colombia. 23
1.2. RAP en Bogotá. 24
1.3. Objetivos: 26
Objetivo general: 26
Objetivos específicos: 26
1.4. Metodología: 26
2. Revisión del estado del arte. 31
2.1. Asfalto espumado 34
2.2. Comportamiento reológico de mezclas elaboradas mediante la técnica de espumado .. 37
2.3. Ventajas medioambientales y económicas del asfalto espumado 53
2.4. Consideraciones de diseño y uso de mezclas tibias 58
2.5. Comparación de Mezclas Tibias (WMA) y Mezclas Calientes Tradicionales (HMA). 65
2.6. Mezclas Tibias y RAP. 70
2.6.1. Manejabilidad de WMA con RAP y HMA con RAP. 115
2.6.2. Granulometría de mezclas que incluyen RAP 126
3. Caracterización y preparación de materiales. 129
3.1. Caracterización del asfalto 129
3.1.1. Norma INV-E-706-13 «Penetración de los materiales bituminosos» y norma INV-E-712-13 «Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)». 129
3.1.2. Norma INV-E-717-13 «Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional» 129
3.2. Caracterización de la espuma de asfalto. 130
3.3. Caracterización de los agregados. 131
3.4. Caracterización del RAP 133

3.5. Comprobación de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente 137
3.5.1. Norma INV-E-748-13 «Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall». 138
3.5.2. Gravedades específicas de la mezcla asfáltica en caliente. 138
3.6. Determinación de parámetros para mezclas tibias 139
3.6.1. Determinación de temperaturas de compactación de la mezcla según su N92..... 141
3.6.1.1. Compactabilidad según el contenido de RAP 141
3.6.1.2. Compactabilidad según temperatura de agregados 144
3.6.2. Análisis de cubrimiento de agregados por el asfalto 146
4. Resultados y Análisis 147
4.1. Ensayos de desempeño de mezclas 147
4.1.1. Norma INV-E-725-13 «Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta»..... 147
4.1.2. Estimación del trabajo de fracturación. 151
5. Conclusiones y recomendaciones 155
5.1. Conclusiones..... 155
5.1.1. Aspectos generales de las mezclas tibias con RAP..... 155
5.1.2. Definición de temperaturas de compactación..... 155
5.1.3. Resistencia a la tensión indirecta 156
5.1.4. Trabajo de fractura..... 157
5.1.5. Conclusiones generales 158
5.2. Recomendaciones 158
6. Referencias..... 160

Índice de tablas

Tabla 1 - Porcentaje de ahorro con el uso del RAP 22
Tabla 2 - Explotación de materiales pétreos en Colombia 2012-2018..... 23
Tabla 3 – Tecnologías de mezclas tibias con espumado del asfalto 33
Tabla 4 - Valores de Referencia de WMA 36
Tabla 5 - Beneficios ambientales WMA..... 37
Tabla 6 - Viscosidades en función del contenido de agua de espumado 38
Tabla 7 – Temperaturas de fatiga de las mezclas envejecidas 41
Tabla 8 - Efecto del agua de espumado en la resistencia a la humedad..... 44
Tabla 9 - Minerales que componen los agregados utilizados 45
Tabla 10 - Relación %RAP-Beneficio (USD)..... 56
Tabla 11 - Foaming Índex según temperaturas de mezclado y cantidad de agua 59
Tabla 12 - Life Cycle Inventory para la producción, construcción, mantenimiento y operación de vías con HMA. 66
Tabla 13 - Diferencias de consumos entre HMA y WMA..... 68
Tabla 14 – Reducción porcentual de emisiones WMA vs HMA 68
Tabla 15 - Proyectos estudiados por Buss et al. (2015) 70
Tabla 16 - Mezclas con RAP y material virgen..... 74
Tabla 17 - Propiedades de los asfaltos analizados 75
Tabla 18 - Efecto del RAP en la susceptibilidad a la humedad 80
Tabla 19 – en Propiedades técnicas del asfalto utilizado 80
Tabla 20 - Propiedades técnicas del llenante mineral 81
Tabla 21 - Propiedades volumétricas de las mezclas elaboradas 88
Tabla 22 - Valores de TSR obtenidos durante la investigación 89
Tabla 23 - Propiedades de las mezclas utilizadas para las líneas..... 91
Tabla 24 - Resultados prueba Wheel Track 92
Tabla 25 - Temperaturas de trabajo - WMA 98
Tabla 26 - Clasificación del asfalto utilizado por Dinis-Almeida y Afonso 107
Tabla 27 - Temperaturas de elaboración de las mezclas asfálticas 108
Tabla 28 - Gradación de las mezclas..... 108
Tabla 29 - Resultados de los cálculos para el diseño de la mezcla con RAP 110
Tabla 30 - Propiedades de las mezclas elaboradas Dinis-Almeida & Lopes Afonso 110

Tabla 31 - Resultados de rigidez 111
Tabla 32 - Gradación de la mezcla tibia 113
Tabla 33 - Características del asfalto utilizado 113
Tabla 34 - Variación de la resistencia a la tracción indirecta 114
Tabla 35 - Mezclas de control para índice de cobertura 116
Tabla 36 - Temperaturas de mezclado y envejecimiento 116
Tabla 37 – Propiedades de las mezclas compactadas con SGC 118
Tabla 38 - Valores de N92 para las mezclas analizadas 120
Tabla 39 - Variación porcentual del N92 en las mezclas analizadas 120
Tabla 40 - Relación entre No. de ejes equivalentes y número de giros N 123
Tabla 41 –Relación entre No. de giros N y porcentaje de densidad teórica 124
Tabla 42 - Inclusión de agregados vírgenes en el RAP 128
Tabla 43 - Penetración y punto de ablandamiento del asfalto virgen 129
Tabla 44 - Viscosidad del asfalto virgen 129
Tabla 45 - Resultados de desgaste en máquina de «Los Ángeles» 132
Tabla 46 – Penetración y punto de ablandamiento del asfalto del RAP 133
Tabla 47 - Viscosidad del asfalto del RAP 133
Tabla 48 - Granulometría del RAP 135
Tabla 49 - Granulometría de los agregados del RAP 135
Tabla 50 - Equivalencia granulometrías roca negra- agregados RAP 137
Tabla 51 - Estabilidad y flujo de la mezcla «MC» 138
Tabla 52 - Gravedades específicas y vacíos con aire - Mezcla «MC» 139
Tabla 53 - Distribución de material reciclado y virgen en mezclas con RAP 140
Tabla 54 - Número de ciclos para N92 según contenido de RAP 143
Tabla 55 – Número de ciclos para N92 según temperatura de agregados 145
Tabla 56 – Resultados de absorción de las mezclas asfálticas según su temperatura... 146
Tabla 57 - Resultados de los ensayos de tensión 147
Tabla 58 – Trabajo de fractura 152
Tabla 59 - Penetración - Asfalto virgen 165
Tabla 60 - Punto de ablandamiento - Asfalto virgen 165
Tabla 61 - Viscosidad - Asfalto virgen 165
Tabla 62 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 140°C 166
Tabla 63 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 150°C 167

Tabla 64 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 160°C 167
Tabla 65 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 170°C 168
Tabla 66 - Desgaste en máquina de «Los Ángeles» - Agregados con tamaño máximo nominal de 1" 169
Tabla 67 - Desgaste en máquina de «Los Ángeles» - Agregados con tamaño máximo nominal de 3/4" 170
Tabla 68 - Penetración - Asfalto recuperado 170
Tabla 69 - Punto de ablandamiento - Asfalto recuperado 170
Tabla 70 - Viscosidad - Asfalto recuperado 171
Tabla 71 - Contenido de asfalto del RAP 172
Tabla 72 – Control de masa tamizada - RAP 173
Tabla 73 – Distribución de porcentajes por tamiz - RAP 173
Tabla 74 – Control de masa tamizada – Agregados del RAP 173
Tabla 75 –Distribución de porcentajes por tamiz – Agregados del RAP 173
Tabla 76 - Resultados de estabilidad y flujo – Mezcla caliente de control con 6% de asfalto 174
Tabla 77 - Relación estabilidad/flujo – Mezcla caliente de control con 6% de asfalto 174
Tabla 78 - Densidad máxima, mezcla caliente 175
Tabla 79 - Densidad «bulk», mezcla caliente 175
Tabla 80 - Número de giros para N92 - MC 175
Tabla 81 - Número de giros para N92 - MT40, 100°C 176
Tabla 82 - Número de giros para N92 - MT40, 120°C 177
Tabla 83 - Número de giros para N92 - MT40, 140°C 178
Tabla 84 - Número de giros para N92 - MT50, 100°C 179
Tabla 85 - Número de giros para N92 - MT50, 120°C 180
Tabla 86 - Número de giros para N92 - MT50, 140°C 181
Tabla 87 - Número de giros para N92 - MT60, 100°C 182
Tabla 88 - Número de giros para N92 - MT60, 120°C 183
Tabla 89 - Número de giros para N92 - MT60, 140°C 184
Tabla 90 - Tensión indirecta, mezcla «MC» 185
Tabla 91 - Tensión indirecta, mezcla «MT» 185
Tabla 92 - Tensión indirecta, mezcla «MT40» 186
Tabla 93 - Tensión indirecta, mezcla «MT50» 186

Tabla 94 - Tensión indirecta, mezcla «MT60»..... 187
Tabla 95 - Tensión indirecta, mezcla «MT50-135» 187
Tabla 96 - Tensión indirecta, mezcla «MT60-135» 188
Tabla 97 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MC» falladas en condición húmeda 189
Tabla 98 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT» falladas en condición húmeda 190
Tabla 99 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT40» falladas en condición húmeda..... 191
Tabla 100 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT50» falladas en condición húmeda..... 192
Tabla 101 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT60» falladas en condición húmeda..... 193
Tabla 102 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT50-135» falladas en condición húmeda..... 194
Tabla 103 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT60-135» falladas en condición húmeda..... 195
Tabla 104 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MC» 196
Tabla 105 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT» 197
Tabla 106 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT40» 198
Tabla 107 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50» 199
Tabla 108 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60» 200
Tabla 109 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50-135» 201
Tabla 110 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60-135» 202

Índice de figuras

Figura 1 - Procedimiento de espumado 32
Figura 2 – Viscosidades en función del contenido de agua de espumado 38
Figura 3 –Módulo del asfalto espumado vs temperatura 39
Figura 4 – Pérdida de módulo del asfalto espumado vs temperatura 40
Figura 5 –Factor de fatiga vs Temperatura 41
Figura 6 – TSR de Mezcla sin envejecer vs Mezcla envejecida 42
Figura 7 - Efectos de la temperatura de compactación en la susceptibilidad a la humedad 43
Figura 8 - Montaje de la máquina MTS Tabletop 858 46
Figura 9 - Resultados de la prueba en la MTS Tabletop 858 47
Figura 10 - Efecto de la humedad de los agregados en la adhesión 48
Figura 11 - Trabajo de adhesión asfalto-agregados en función del contenido de humedad de los agregados 49
Figura 12 - Composición química de los principales agregados utilizados en construcción de vías 51
Figura 13 - Efecto de la gradación de los agregados en la deformación permanente de la mezcla. 52
Figura 14 - Consumo de combustibles y emisiones de gases según tipo de mezcla asfáltica 54
Figura 15 - Reducción del impacto ambiental por aprovechamiento del RAP 55
Figura 16 - Reducción de costos por aprovechamiento de RAP 56
Figura 17 - Temperatura óptima de espumado WMA 61
Figura 18 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP 62
Figura 19 - Tasa de mezclado VG-RM 64
Figura 20 - Tasas de mezclado VM-RF 65
Figura 21 - Life Cycle Inventory HMA 67
Figura 22 - Reducción del impacto ambiental en diferentes aspectos al usar WMA 69
Figura 23 – Comportamiento de mezclas HMA vs WMA-FA 70
Figura 24 - Índice de envejecimiento de las mezclas 72
Figura 25 - Coeficiente de significancia 73
Figura 26 - Viscosidad de los bitúmenes 76

Figura 27 - Temperatura vs viscosidad del asfalto 77
Figura 28 - Comportamiento de la relación de expansión en función de la temperatura y la cantidad de agua de espumado 82
Figura 29 - Comportamiento de la vida media en función de la temperatura y el agua de espumado 82
Figura 30 - Índice de espumado en función del agua de espumado 83
Figura 31 - Relación de radio de expansión-vida media vs cantidad de agua 84
Figura 32 - Comportamiento reológico de las muestras – Altas temperaturas 86
Figura 33 - Comportamiento reológico las muestras – Bajas temperaturas 86
Figura 34 - Granulometría utilizada 87
Figura 35 - Valores de TSR obtenidos durante la investigación 89
Figura 36 - Resultados prueba Wheel Track 92
Figura 37 - Resultados de la prueba Flexural Beam Fatigue 93
Figura 38 - Clasificación de los proyectos del estudio 94
Figura 39 - Trabajo de fractura 95
Figura 40 - Resultados de resistencia a la fisuración por fatiga 1ra ronda 96
Figura 41 - Resultados de la resistencia a la fisuración por fatiga 2da ronda 97
Figura 42 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP 99
Figura 43 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP (Espumado para rodadura) 99
Figura 44 - Resistencia a la fatiga vs Porcentaje de RAP (2012) 100
Figura 45 - Resistencia a la Fatiga vs Porcentaje de RAP (2013) 101
Figura 46 - Resistencia a la humedad vs Porcentaje de RAP (2012) 102
Figura 47 - Resistencia a la Humedad vs Porcentaje de RAP (2013) 102
Figura 48 - Comparación HMA-WMA en la falla 104
Figura 49 - Comparación HMA-WMA energía de fractura 104
Figura 50 - Longitud de la fisuras por tipo de mezcla 105
Figura 51 - Resultados de los ensayos de tracción indirecta 106
Figura 52 - Resultados de los ensayos de TSR 106
Figura 53 - Sensibilidad a la Humedad 111
Figura 54 - Resistencia a la Fatiga 112
Figura 55 - Variación del módulo resiliente 114
Figura 56 –Resultados de cobertura de agregados 117
Figura 57 – Resultados de N92 para los distintos tipos de mezclas. 119

Figura 58 – Presentación gráfica del CEI 121
Figura 59 – Compactación vs Temperatura 122
Figura 60 - Viscosidad WMA vs HMA 125
Figura 61 - Resistencia a la Fatiga WMA vs HMA 126
Figura 62 - Granulometrías del RAP del acuerdo 467 127
Figura 63 - Viscosidad del asfalto virgen 130
Figura 64 – Variación de la vida media y la tasa de expansión de la espuma de asfalto en función de la temperatura y el contenido de agua 131
Figura 65 - Viscosidad del asfalto del RAP 134
Figura 66 - Granulometría del RAP y de los agregados del RAP 136
Figura 67 – Franja granulométrica estimada de las mezclas analizadas 140
Figura 68 - Compactabilidad de la mezcla MT40 142
Figura 69 - Compactabilidad de la mezcla MT50 142
Figura 70 - Compactabilidad de la mezcla MT60 143
Figura 71 - Compactabilidad de las mezclas tibias propuestas con agregados a 100°C 144
Figura 72 - Compactabilidad de las mezclas propuestas con agregados a 120°C 145
Figura 73 - Compactabilidad de las mezclas propuestas con agregados a 140°C 145
Figura 74 – Resultados de resistencia a la tensión en condición seca 148
Figura 75 – Resultados de resistencia a la tensión en condición húmeda 149
Figura 76 - Relaciones de resistencia a la tensión (TSR) 150
Figura 77 – Cálculo de trabajo de fracturación 151
Figura 78 – Comparativa entre trabajo de fracturación y carga máxima soportada 153
Figura 79 – Curvas de –carga vs deformación 154
Figura 80 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 140°C 166
Figura 81 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 150°C 167
Figura 82 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 160°C 168
Figura 83 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 170°C 169
Figura 84 - Número de giros para N92 - MC 176
Figura 85 - Número de giros para N92 - MT40, 100°C 177
Figura 86 - Número de giros para N92 - MT40, 120°C 178
Figura 87 - Número de giros para N92 - MT40, 140°C 179
Figura 88 - Número de giros para N92 - MT50, 100°C 180
Figura 89 - Número de giros para N92 - MT50, 120°C 181

Figura 90 - Número de giros para N92 - MT50, 140°C 182
Figura 91 - Número de giros para N92 - MT60, 100°C 183
Figura 92 - Número de giros para N92 - MT60, 120°C 184
Figura 93 - Número de giros para N92 - MT60, 140°C 184
Figura 94 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MC» 197
Figura 95 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT» 198
Figura 96 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT40» 199
Figura 97 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50» 200
Figura 98 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60» 201
Figura 99 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50-135» 202
Figura 100 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60-135» 203

Índice de anexos

7. Anexos 165
7.1. Caracterización del asfalto virgen 165
Penetración 165
Punto de ablandamiento 165
Viscosidad 165
7.2. Caracterización de la espuma de asfalto 166
Temperatura: 140°C 166
Temperatura: 150°C 167
Temperatura: 160°C 167
Temperatura: 170°C 168
7.3. Caracterización de agregados vírgenes 169
Desgaste en máquina de los ángeles 169
7.4. Caracterización del RAP 170
7.4.1. Caracterización del asfalto del RAP 170
Penetración 170
Punto de ablandamiento 170
Viscosidad 171
7.4.2. Determinación del contenido de asfalto en el RAP 172
7.4.3. Caracterización de los agregados del RAP 173
Granulometría del RAP 173
Granulometría de los agregados del RAP 173
7.5. Comprobación de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente 174
7.5.1. Estabilidad/flujo 174
7.5.2. Gravedades específicas de la mezcla caliente 175
Densidad máxima 175
7.6. Resultados de compactabilidad 175
Mezcla «MC» 175
Mezcla «MT40» 176
Mezcla «MT50» 179
Mezcla «MT60» 182
7.7. Resultados de resistencia a la tensión indirecta 185
7.7.1. Registro fotográfico de briquetas falladas en condición «húmeda» 189

7.8. Curvas carga vs deformación 196

1. Introducción

Las redes viales tienen incidencias importantes frente a factores tales como el consumo de energía (mediante su interacción con los vehículos que la circulan, puesto que según su diseño geométrico y el estado general de su superficie afectan el consumo de combustible y por lo tanto la emisión de gases de efecto invernadero por parte de los automotores, según datos de la Environmental Protection Administration el 27.3% de las emisiones de gases de efecto invernadero se atribuyen al sector transporte) siendo importante la etapa de mantenimiento de las vías en la reducción de emisiones de estos gases.

Por otro lado, según datos del DANE, de 120 países, Colombia se encuentra en el puesto 97 de la relación kilómetros por habitante y una densidad de carreteras pavimentadas de tan sólo 0.013km/km2, presentando una calidad de infraestructura inferior a países de la región como Chile, México, Brasil, Uruguay, Argentina y Ecuador (DANE, 2019).

Es importante tener en cuenta que durante los periodos de servicio de las vías, los materiales que las componen debido a los factores climáticos, el tránsito y condiciones geológicas y geométricas del diseño se ven sometidos a procesos de envejecimiento que provocan que gradualmente pierdan propiedades y la capacidad para desempeñar su función correctamente. Sin embargo, estas propiedades pueden ser restituidas como por ejemplo en el caso de la mezcla asfáltica mediante su reciclado. Estados Unidos se ha enfocado en el reciclaje de pavimentos asfáltico desde el año 1996, razón por la cual este país es un referente en el tema. Según datos de la FHWA en 2016 se ahorraron en total 2.2 billones de dólares, cifra que en 2017 logró un valor de 2.6 billones de dólares, esto gracias a que en el 2016 se reutilizaron 76.2 millones de toneladas de RAP y en 2017, 74 millones de toneladas, lo que implica que un 99% del material asfáltico retirado fue reutilizado y ambientalmente significa que en total un volumen igual a 33’750.000 m^3 de rellenos fueron liberados y una gran cantidad de agregados pétreos no requirieron extraerse.

A partir de datos compilados por la FHWA, esta entidad pudo estimar un porcentaje de ahorro en costos en función del contenido de RAP utilizado, como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1 - Porcentaje de ahorro con el uso del RAP

RAP %	Costo/Tonelada	Ahorro Dólares/Tonelada	Ahorro %
0	11.9	-	-
20	10.26	1.64	14
30	9.44	2.46	21
40	8.62	3.28	28
50	7.8	4.1	34

Fuente: Federal Highway Administration, 2019.

Considerando los beneficios que trae el reciclado de pavimento asfáltico a nivel económico, se deben tener en cuenta los datos obtenidos del Anuario Estadístico Minero 2007-2012, en donde se señala que Colombia importó materiales de construcción y combustibles-lubricantes (incluyendo derivados del petróleo y el carbón) por montos de 1.958,7 y 5.73, 9 millones de dólares respectivamente MinMinas GM, (2019). Se aclara que se incluyen los combustibles y lubricantes porque esta cifra contempla los valores invertidos en materiales derivados del petróleo (como el asfalto) y porque los combustibles (incluido el carbón) son utilizados en la elaboración de las mezclas asfálticas durante el proceso de aumento de la temperatura para su fabricación.

El Anuario Estadístico minero complementa estos datos al indicar que la explotación de minas y canteras ha generado egresos por 6.693,3 millones de dólares entre los años 2007 a 2012.

Por otra parte, según datos suministrados por parte de la Agencia Nacional de Minería mediante radicado ANM No: 20193210284051, la explotación de materiales y minerales de origen pétreo en Colombia en el periodo comprendido entre los años 2012 y 2018 se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2 - Explotación de materiales pétreos en Colombia 2012-2018.

Nombre Recurso Natural	Nombre Unidad Medida	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Total general
ARCILLA	TONELADAS	22,061	22,221	1,807,500	1,776,468	669,151	1,471,302	-	5,768,704
ARCILLA BENTONICAS	TONELADAS	350	106,187	24,873	139,402	105,899	66,869	53,198	496,778
ARCILLAS CAOLINITICAS	TONELADAS	17,200	64,684	878	5,269	8,510	46,456	28,932	171,929
ARCILLAS CERAMICAS	TONELADAS	312,316	1,812,510	1,522,244	1,860,377	1,916,577	1,595,338	1,568,435	10,587,797
ARCILLAS FERRUGINOSAS	TONELADAS	508,373	191,975	153,856	146,717	132,496	66,458	74,515	1,274,390
ARCILLAS MISCELANEAS	TONELADAS	1,133,460	2,425,871	830,503	1,702,832	2,300,090	1,063,382	2,228,665	11,684,804
ARCILLAS REFRACTARIAS	TONELADAS	832				300			1,132
ARENA DE CANTERA	METROS CUBICOS	330,400	1,573,033	2,694,515	2,181,808	553,057			7,332,813
ARENA DE RIO	METROS CUBICOS	1,085,579	8,804,276	2,355,300	2,509,406	650,466			15,405,028
ARENAS	METROS CUBICOS	349,449	308,795	329,037	1,427,399	3,633,159	5,050,500	3,305,060	14,403,399
ARENAS NEGRAS	KILOGRAMOS	195,379	36,301	91,431	885				323,996
ARENAS SILICEAS	METROS CUBICOS	272,742	256,547	184,899	234,458	296,390	379,968	589,702	2,214,707
GRAVA DE CANTERA	METROS CUBICOS	1,307,154	2,577,313	3,993,249	8,761,932	752,867			17,392,515
GRAVAS	METROS CUBICOS	2,163,982	2,754,692	1,182,684	1,451,592	9,062,600	10,219,204	6,271,675	33,106,429
GRAVAS DE RIO	METROS CUBICOS	5,024,563	11,421,869	12,371,614	4,909,770	2,156,773			35,884,589
PIEDRA ARENISCA-PIEDRA BOGOTANA	METROS CUBICOS		7,917		549		2,400	4,536	15,402

Fuente: Agencia Nacional de Minería, 2019.

Se puede observar como en total a lo largo de tan sólo 7 años se han explotado 86’383.533 m^3 de gravas en el país, con esta cantidad de volumen se podrían construir aproximadamente 35 estructuras de la envergadura de la gran pirámide de Keops, esto sin contar los materiales finos que se utilizan como llenante mineral y materiales con tamaños que generen una cantidad de vacíos menores durante la compactación, de los cuales se extrajeron durante el mismo periodo de tiempo en total 69’665.476 m^3.

1.1. RAP - Reclaimed Asphalt Pavement, en Colombia.

En Colombia por parte de la Agencia Nacional de Infraestructura ANI se ha realizado una inversión superior a los 45 billones de pesos para la construcción de las vías 4G, donde se tienen previstos 141 túneles, 1.300 viaductos y 1.370 kilómetros de dobles calzadas, lo que abre la puerta a dos escenarios en los que el RAP puede ser provechoso:

- Utilización de RAP en nuevas mezclas durante la construcción permitirá utilizar el dinero de esta inversión de una manera eficiente.
- Durante la operación y mantenimiento de estas vías una gran cantidad de RAP puede aprovecharse para reducir los costos de operación de las entidades administrativas y de los usuarios.

Según datos de la compañía de trabajos Urbanos S.A.S CTU, las ventajas que se obtienen al reciclar el pavimento asfáltico son las siguientes:

- Reutilización del material.

- Disminución del volumen en botaderos.
- Reducción de costes en pavimentación.
- Ahorro en importación y extracción de materia prima.
- Conservación de suministro de material virgen.
- Disminución de las importaciones de los productos asociados a la obra.
- Reducción de costos de construcción asociados con materiales y acarreos.

1.2. RAP en Bogotá.

A nivel local, mediante la resolución 2397 del 25 de abril de 2011 el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) implementó en sus pliegos licitatorios requerimientos para que en los estudios y diseños se incluya un porcentaje mínimo de RAP o MBR (Mezcla Bituminosa Reciclada). Se estableció en un 10% en el año de la publicación de la resolución con un aumento anual del 5% hasta llegar a un valor del 25%, el cual se calcula en función del área a intervenir.

Por su parte, la «Unidad de Mantenimiento Vial» – UMV, es la encargada de realizar el mantenimiento de la malla vial de la ciudad de Bogotá, dentro de las actividades que realizan para recuperar la capacidad estructural del pavimento ampliando así su vida útil y que son atinentes al problema en desarrollo, se encuentran:

- Fresado de carpeta asfáltica.
- Suministro e instalación del material granular o pavimento asfáltico reciclado.
- Suministro e instalación de carpeta asfáltica.

Durante el mantenimiento de la malla, la UMV realiza parcheos, bacheos (aunque no se especifica si se utiliza material reciclado) y fresado estabilizado (donde se utiliza material reciclado para la instalación de una carpeta provisional, siendo este un uso poco apropiado para un material de estas características).

Los productos ofrecidos por la UMV se mencionan a continuación:

- Mezclas asfálticas: mezclas asfálticas provenientes de agregados vírgenes.
- Asfaltos modificados: centrándose únicamente en la utilización del Grano de Caucho Reciclado y agentes modificadores.
- Fresado con emulsión: Material triturado y mezclado con emulsión para la instalación del «fresado estabilizado».

La Unidad de mantenimiento Vial posee cuatro plantas propias de producción para la ejecución de obras de rehabilitación y mantenimiento de la malla vial de la ciudad. Estas

plantas se encuentran ubicadas en el Parque Minero Industrial «El Mochuelo», predio «La Esmeralda – Planta El Zuque» en el kilómetro 3 vía a Paquilla en la localidad de ciudad Bolívar. Se trata de dos plantas de mezclas asfálticas en caliente, una planta dosificadora para la producción de concreto hidráulico y una planta de asfalto en frío para el «aprovechamiento» del RAP y la producción de fresado estabilizado; en este punto se hace evidente que, según la información ofrecida por la UMV, el material asfáltico reciclado sólo se está utilizando en mezclas frías. Esto significa que el RAP se está mezclando con emulsiones utilizándose a modo de «roca negra»; es decir como agregados pétreos unidos por asfalto cuyo uso se limita a rellenos, estabilizaciones e incluso en mezclas para la conformación de carpetas provisionales como lo indica la UMV. De esta manera, se está malgastando este material sin conseguirse en Colombia los beneficios económicos y ambientales como en Estados Unidos.

El desaprovechamiento de este material se ve confirmado en la definición que da la UMV al término «Pavimento asfáltico reciclado» y que se presenta a continuación: «Es la reutilización del material obtenido de la disgregación de la carpeta asfáltica deteriorada mezclada con parte del material granular subyacente a esta, mediante procesos de fresado, con la finalidad de producir una capa de base estabilizada o mejorada, que elimine la capa asfáltica deteriorada y sustituya a la base granular de soporte de la estructura de pavimento existente», dejando claro que el material asfáltico reciclado se está utilizando únicamente mediante procedimientos en frío.

Finalmente, según datos aportados por la UMV mediante radicado 20191310013531, esta entidad ha realizado el fresado y estabilizado con emulsión de 11.998,86 m^3 en 2017, 2.617,95m^3 más en 2018 y en lo que va corrido del 2019 de 100,99 m^3 para un total de 4.616,81 m^3 de RAP, evidenciando que a todo este material se le ha dado un uso que saca poco provecho con miras a los beneficios ambientales y económicos que ofrece.

Por lo tanto, considerando las ventajas medioambientales y económicas que trae consigo el uso del RAP en la fabricación de mezclas asfálticas, así como el pobre manejo que se le da a este material en Colombia, es importante establecer metodologías que permitan evaluar el comportamiento del RAP, determinar cantidades

máximas según el proceso de fabricación, el uso que se le dará y las características particulares tanto de cada proyecto como del material reciclado en sí.

1.3. Objetivos:

Objetivo general:

- Evaluar el efecto que tiene el aumento del porcentaje de RAP en las propiedades de las mezclas asfálticas tibias fabricadas con la tecnología de espumado.

Objetivos específicos:

- Evaluar la resistencia a la tracción indirecta de mezclas asfálticas tibias fabricadas con la tecnología de espumado y diferentes porcentajes de RAP.
- Determinar la incidencia del RAP en la susceptibilidad a la humedad que presentan las mezclas asfálticas tibias fabricadas con asfalto espumado.
- Comparar los resultados de resistencia a la tracción y susceptibilidad a la humedad con los obtenidos en una muestra de control elaborada en caliente.

1.4. Metodología:

La metodología propuesta para el desarrollo del estudio y el cumplimiento de los objetivos, se dividió en 5 etapas. Algunos aspectos del trabajo se basaron en lo contemplado en las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Instituto Nacional de Vías en el capítulo 4 – Pavimentos Asfálticos, Artículos 450-13 «Mezclas Asfálticas en Caliente de Gradación Continua (Concreto Asfáltico)» y 462-13 «Reciclado de Pavimentos Asfálticos en Planta y en Caliente».

La metodología que se siguió en el estudio fue experimental basada en estudios y reportes de la literatura técnica y científica relacionada. Se realizaron principalmente ensayos de laboratorio para caracterizar mezclas tibias con espumado (WMA-FA) con diferentes concentraciones de RAP.

ETAPA 1 –Revisión bibliográfica.

Revisión del estado del arte de mezclas tibias con tecnología de asfaltos espumado y uso de RAP. Definiciones, procedimientos de elaboración de la espuma de asfalto y fabricación de mezclas, en donde se amplía el concepto del parámetro «N92» y se determina la corrección granulométrica que debe efectuarse al RAP, evaluación de

propiedades y desempeño de las mezclas derivados de estudios de laboratorio y campo.

ETAPA 2 - Caracterización de materiales y verificación de la fórmula de trabajo.

Durante la ejecución del estudio se siguió la fórmula de trabajo sugerida por el proveedor de los materiales, quien utiliza los agregados vírgenes y el asfalto como materias primas para la elaboración de mezclas densas en caliente tipo MDC-19. Este mismo proveedor suministró el RAP del estudio.

Con el fin de caracterizar los materiales, se realizaron los siguientes ensayos:

- Agregados vírgenes: Ensayos básicos de Granulometría (INV E-213-13) y desgaste en máquina de «Los Ángeles» (INV-E-218-13). Previo a la fabricación de cada una de las mezclas, se realizó un tamizaje para seleccionar las fracciones de material de manera tal que cumplieran con la granulometría media exigida para una mezcla tipo MDC-19, según lo establecido en la tabla «Tabla 450 - 6. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua» de la especificación INVIAS.
- RAP:
    - Contenido de Asfalto del RAP (INV-E-732-13)
    - Recuperación de asfalto proveniente del RAP (INV-E-759)-13.
    - Penetración del asfalto recuperado (INV-E-706-13).
    - Punto de ablandamiento del asfalto recuperado (INV-E-712-13).
    - Viscosidad – temperatura del asfalto recuperado (INV-E-717-13).
    - Granulometría del RAP (INV E-213-13).
    - Granulometría de los agregados contenidos en el RAP (INV E-213-13).
- Cemento Asfáltico:
    - Grado de penetración del asfalto (INV-E-706-13).
    - Punto de ablandamiento (INV-E-712-13).
    - Viscosidad – Variación de la viscosidad con la temperatura (INV-E-717-13).
- Verificación de la fórmula de trabajo:
  Con los agregados y asfalto suministrados se verificó, mediante la elaboración de probetas de control, la fórmula de trabajo suministrada por el proveedor del material, evaluando el cumplimiento de los requisitos de las especificaciones vigentes al respecto, en particular, estabilidad, Flujo y vacíos con aire.

ETAPA 3 – Caracterización de la espuma de asfalto y definición de las temperaturas de los agregados (vírgenes y RAP) para la elaboración de las mezclas tibias con asfalto espumado (WMA-FA).

Esta etapa incluye las siguientes actividades:

- Caracterización de la espuma de asfalto en planta de laboratorio WLB-10S: fabricación de espumas con el asfalto calentado a temperaturas de 140°C, 150°C, 160°C y 170°C y concentraciones de agua de 1%, 2%, 3% y 4%, para establecer las condiciones para las cuales se obtienen adecuadas características de Relación de Expansión, Vida Media e Índice de Espumado.
- Definición de la temperatura de calentamiento de los agregados para la elaboración de la WMA-FA, en función de la compactabilidad y el cubrimiento de los agregados por el asfalto para cada una de las mezclas elaboradas con diferentes concentraciones de RAP (40, 50 y 60%), cumpliendo los requisitos de granulometría y contenido de asfalto establecidos en la fórmula de trabajo. Se trabajaron tres (3) temperaturas de ensayo de calentamiento de los agregados, de 100°C, 120°C y 140°C. La evaluación del cubrimiento de los agregados por el asfalto, para cada mezcla fabricada, se realizó en función de la cantidad de agua que absorbe la mezcla asfáltica en comparación con la cantidad de agua que absorben los agregados antes de ser mezclados con el asfalto (INV-E-223-13). La evaluación de la manejabilidad o compactabilidad de cada mezcla se llevó a cabo en función del valor «N92» definido por la NCHRP.

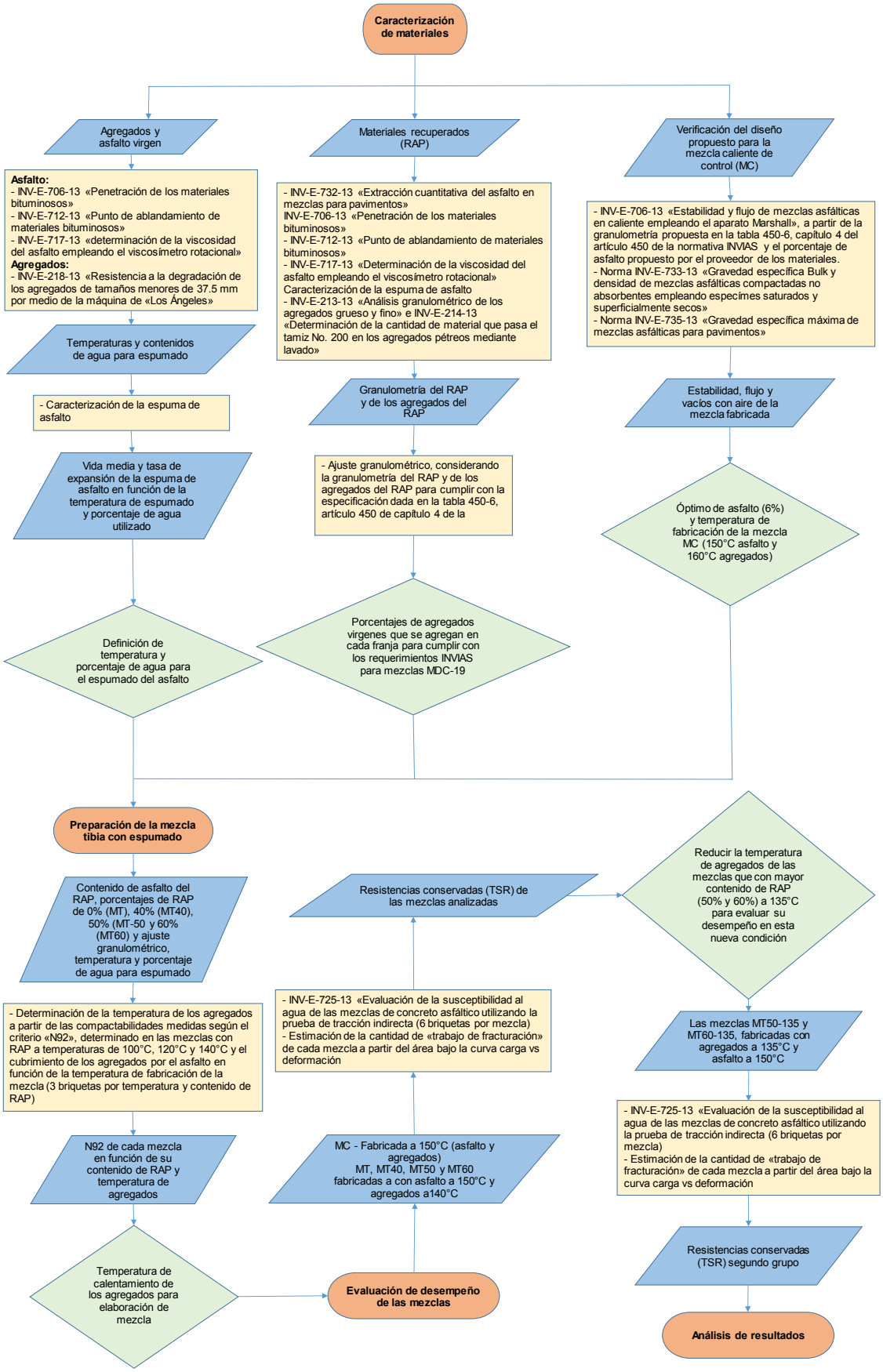
ETAPA 4 – Elaboración de Mezclas WMA-FA y Caracterización de las mismas.

- Se fabricaron probetas de control HMA con la fórmula de trabajo definida por el proveedor de la materia prima, las cuales fueron sometidas a los mismos ensayos que se describen a continuación para las mezclas WMA-FA.
- Fabricación de probetas de mezclas WMA-FA, con las diferentes concentraciones de RAP (0, 40, 50 y 60%), bajo las condiciones definidas en la etapa anterior y siguiendo la fórmula de trabajo establecida por el proveedor de los materiales, sobre las cuales se realizarán ensayos en laboratorio para evaluar:
    - Las propiedades de rotura de los ligantes asfálticos en el ensayo de tracción indirecta (INV-E-722-13).
    - La susceptibilidad al agua utilizando la prueba de tracción indirecta (INV-E-725-13).
    - El asfalto adherido durante el proceso de mezclado (INV-E-732-13).

ETAPA 5 – Análisis de resultados.

En esta etapa se recopilaron todos los resultados y los análisis de los mismos.

En el diagrama de flujo que se presenta a continuación, se puede ver de manera resumida la metodología seguida en este estudio para alcanzar los objetivos planteados.


Caracterización de materiales
Agregados y asfalto virgen
Materiales recuperados (RAP)
Verificación del diseño propuesto para la mezcla caliente de control (MC)
Asfalto:
- INV-E-706-13 «Penetración de los materiales bituminosos»
- INV-E-712-13 «Punto de ablandamiento de materiales bituminosos»
- INV-E-717-13 «determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional»
Agregados:
- INV-E-218-13 «Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm por medio de la máquina de «Los Ángeles»
- INV-E-732-13 «Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos»
INV-E-706-13 «Penetración de los materiales bituminosos»
- INV-E-712-13 «Punto de ablandamiento de materiales bituminosos»
- INV-E-717-13 «Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional»
Caracterización de la espuma de asfalto
- INV-E-213-13 «Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino» e INV-E-214-13 «Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz No. 200 en los agregados pétreos mediante lavado»
- INV-E-706-13 «Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall», a partir de la granulometría propuesta en la tabla 450-6, capítulo 4 del artículo 450 de la normativa INVIAS y el porcentaje de asfalto propuesto por el proveedor de los materiales.
- Norma INV-E-733-13 «Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímes saturados y superficialmente secos»
- Norma INV-E-735-13 «Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos»
Temperaturas y contenidos de agua para espumado
- Caracterización de la espuma de asfalto
Vida media y tasa de expansión de la espuma de asfalto en función de la temperatura de espumado y porcentaje de agua utilizado
Definición de temperatura y porcentaje de agua para el espumado del asfalto
Granulometría del RAP y de los agregados del RAP
- Ajuste granulométrico, considerando la granulometría del RAP y de los agregados del RAP para cumplir con la especificación dada en la tabla 450-6, artículo 450 de capítulo 4 de la
Porcentajes de agregados vírgenes que se agregan en cada franja para cumplir con los requerimientos INVIAS para mezclas MDC-19
Estabilidad, flujo y vacíos con aire de la mezcla fabricada
Óptimo de asfalto (6%) y temperatura de fabricación de la mezcla MC (150°C asfalto y 160°C agregados)
Preparación de la mezcla tibia con espumado
Contenido de asfalto del RAP, porcentajes de RAP de 0% (MT), 40% (MT40), 50% (MT-50 y 60% (MT60) y ajuste granulométrico, temperatura y porcentaje de agua para espumado
- Determinación de la temperatura de los agregados a partir de las compactabilidades medidas según el criterio «N92», determinado en las mezclas con RAP a temperaturas de 100°C, 120°C y 140°C y el cubrimiento de los agregados por el asfalto en función de la temperatura de fabricación de la mezcla (3 briquetas por temperatura y contenido de RAP)
N92 de cada mezcla en función de su contenido de RAP y temperatura de agregados
Temperatura de calentamiento de los agregados para elaboración de mezcla
Evaluación de desempeño de las mezclas
MC - Fabricada a 150°C (asfalto y agregados)
MT, MT40, MT50 y MT60 fabricadas a con asfalto a 150°C y agregados a140°C
- INV-E-725-13 «Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (6 briquetas por mezcla)
- Estimación de la cantidad de «trabajo de fracturación» de cada mezcla a partir del área bajo la curva carga vs deformación
Resistencias conservadas (TSR) de las mezclas analizadas
Reducir la temperatura de agregados de las mezclas que con mayor contenido de RAP (50% y 60%) a 135°C para evaluar su desempeño en esta nueva condición
Las mezclas MT50-135 y MT60-135, fabricadas con agregados a 135°C y asfalto a 150°C
- INV-E-725-13 «Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (6 briquetas por mezcla)
- Estimación de la cantidad de «trabajo de fracturación» de cada mezcla a partir del área bajo la curva carga vs deformación
Resistencias conservadas (TSR) segundo grupo
Análisis de resultados

2. Revisión del estado del arte.

Las mezclas tibias ofrecen ventajas medioambientales debido a sus bajas temperaturas de elaboración y compactación respecto a las mezclas calientes y también porque presentan un mejor desempeño cuando son elaboradas utilizando pavimento asfáltico recuperado (RAP) en grandes proporciones. Varios estudios se han adelantado con el propósito de evaluar el comportamiento de las mezclas tibias con RAP. La investigación realizada por parte de Taher & Aman (2016) se encargó de dar una visión general del proceso de reciclado de pavimento asfáltico en combinación con mezclas tibias utilizando la tecnología de espumado. Explicaron como el RAP es generalmente obtenido a través de lo que localmente conocemos como un proceso de fresado que consiste en «moler» el concreto asfáltico existente pulverizándolo en partículas compuestas por asfalto envejecido y agregados cubiertos por el mismo. Este material ha demostrado ser 100% reciclable y poseer un gran valor en términos económicos y medioambientales pero se debe considerar que debido al proceso oxidativo y a su exposición a los factores ambientales y de servicio es un material rígido y susceptible a la fisuración. Una vez obtenido el RAP este es sometido a procedimientos que permiten extraer el asfalto para determinar sus propiedades, los procedimientos utilizados con mayor frecuencia son:

- Solventes:
  Los solventes comúnmente utilizados son los compuestos por metileno clorado tricloroetano (TCA) y tricloroetileno (TCE), sin embargo existen reportes que indican que estos solventes pueden endurecer o envejecer el asfalto.
- Ignición:
  La prueba de ignición en horno está descrita en las normas AASHTO T308 y ASTM D 6307, este método utiliza alta temperatura, normalmente a 538°C, para quemar el asfalto de los agregados de manera continua hasta que arroje 3 medidas iguales de masa en intervalos de 1 minuto.

Después de señalar que las mezclas tibias reducen las temperaturas de elaboración y compactación en un rango comprendido entre los 10-40°C, describen las tecnologías de mezclas tibias existentes las cuales dependen del aditivo utilizado durante el

mezclado y que son explicadas en profundidad más adelante en este numeral. También indican que los agregados pueden ser calentados a una temperatura de hasta 100°C reduciendo así, no sólo la temperatura del asfalto para la elaboración de la mezcla, sino también la temperatura de los agregados. Así mismo, Taher & Aman (2016) reportaron que durante los últimos años se han realizado gran número de investigaciones que concluyen que las tecnologías de mezclas tibias son más aceptables para la inclusión de RAP como se evidenciará a lo largo de este numeral, señalando sin embargo las posibles desventajas que pueden tener este tipo de mezclas como lo son el efecto de «Stripping» (el fenómeno que se da cuando el asfalto se desprende de los agregados) y según el aditivo utilizado, posibles tendencias al ahuellamiento y susceptibilidad a la humedad.

En lo que al asfalto espumado se refiere, Taher & Aman (2016) describen el procedimiento mediante el cual se da el espumado del asfalto, el cual consiste en la inyección de agua fría en pequeñas cantidades (normalmente del 1 al 5% de la masa de asfalto) junto con aire a presión al asfalto caliente. Debido al cambio repentino de temperatura el agua se evapora y este vapor genera en el asfalto un aumento de su volumen. Cuando este aumento de volumen ocurre se añade al asfalto RAP tratado y los agregados, en la Figura 1 se muestra el procedimiento de espumado de un asfalto.

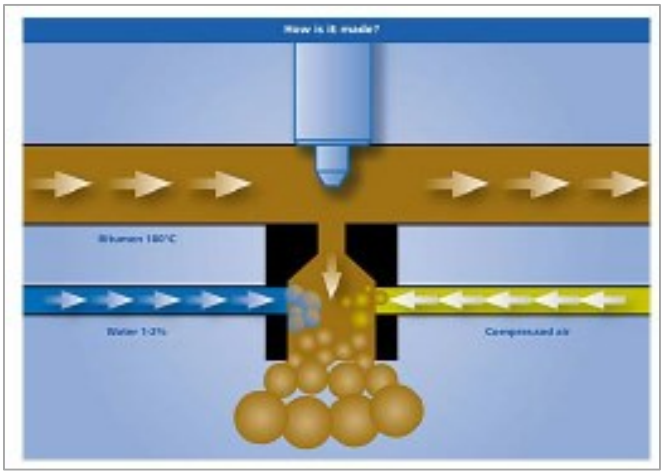


Figura 1 - Procedimiento de espumado

Fuente: (Taher & Aman, 2016)

El asfalto espumado se caracteriza según su relación de expansión y vida media como se explica más adelante. En la Tabla 3 se hace un resumen de las principales formas de elaborar mezclas tibias describiendo el aditivo para espumado, proporción de uso y en algunos casos procedimientos asociados.

Tabla 3 – Tecnologías de mezclas tibias con espumado del asfalto

Aditivo para mezcla tibia	Tecnología de mezcla tibia	Compañía	Recomendación Aditivo/Uso
Aditivo para espumado	Aspha-min	Eurovia and MHI	0.3% del peso total de la mezcla
	Advera WMA	PQ Corporation	0.25% del peso total de la mezcla
	WAM - Foam	Kolo Veidekke Shell Bitumen	No es un aditivo. Es un sistema de mezclado de dos componentes que introduce un bitumen duro y otro blando en diferentes etapas durante la producción en planta
	LEA	LEA-CO	3% de agua con arena fina mezclada con agregados gruesos calientes
	LEAB	Royal Bam Group	0.1% por peso de bitumen
	Double Barrel Green	Astec	2% por peso de bitumen

Fuente: (Taher & Aman, 2016)

Este trabajo concluyó señalando las ventajas del asfalto espumado no sólo frente a las mezclas calientes sino también frente a las mezclas frías y se mencionan brevemente a continuación:

- El asfalto espumado reduce costos de elaboración y transporte debido a las menores cantidades de agua y asfalto que requiere frente a mezclas frías.
- El asfalto espumado ahorra tiempo porque puede ser compactado inmediatamente después de su elaboración y ser puesto en servicio casi inmediatamente.
- El ahorro de energía del asfalto espumado en razón de una necesidad menor de calentamiento (menos temperatura y sólo requiere calentarse durante el proceso de mezclado).

En relación con las mezclas tibias, Rubio et al. (2012) realizaron un trabajo con el fin de dar una visión general de estas tecnologías. En su investigación se destaca la emisión de gases de efecto invernadero durante la elaboración de las mezclas asfálticas, resaltando que al utilizar mezclas tibias se pude reducir la temperatura de mezcla entre 20 y 40°C considerando que las mezclas calientes requieren temperaturas de elaboración comprendidas en un rango de 150 a 190°C, en tanto que las mezclas tibias reducen este rango de 100 a 140°C. Las mezclas tibias son posibles gracias a tecnologías tales como lo son: aditivos químicos, aditivos orgánicos o procesos con agua (espumado). Estas tecnologías presentan ventajas como: reducción en la emisión de gases debido a los combustibles utilizados para calentar las mezclas y en razón de una temperatura inferior las mezclas también emiten menos gases dañinos para la salud de los trabajadores, permiten distancias de transporte más largas, permiten abrir la vía al uso del público con mayor prontitud y permiten extender mayores áreas de pavimento.

2.1. Asfalto espumado

En atención al proceso de «Espumado» resaltan que esta tecnología obedece a la adición de agua, al mezclar al agua con la mezcla caliente, el agua se evapora y el vapor queda atrapado aumentando así el volumen y reduciendo la viscosidad del asfalto, mejorando la capacidad del asfalto de cubrir los agregados y facilitando así la elaboración de la mezcla. Sin embargo, este efecto tiene una duración limitada. La cantidad de agua debe ser añadida de manera cuidadosa, garantizando que sea suficiente para producir el efecto del espumado pero que no genere un efecto de «Stripping», es decir que lave el asfalto de los agregados. El proceso de espumado puede ser generado de las siguientes formas:

- Tecnologías que contienen agua:
  A través de zeolitas sintéticas que almacenan agua en sus vacíos se produce un efecto de espumado cuando estas liberan el agua cristalizada al aumentar la temperatura.
- Tecnologías a base de agua:
  Estas tecnologías utilizan el agua de manera directa, mediante boquillas especiales se inyecta el agua en la mezcla caliente generando así el espumado

que lentamente va colapsando, esta categoría a su vez está dividida en dos subcategorías de la siguiente manera:

- Double Barrel Green: mediante varias boquillas se inyecta el agua fría para espumar microscópicamente el asfalto.
- WAM Foam: este en un método de dos fases en las cuales se alimentan mezclas blandas y rígidas. El asfalto blando se mezcla con los agregados para que los cubra, posteriormente el asfalto rígido se añade a la mezcla después de haber sido espumado mediante la inyección de agua (entre el 2 y el 5% de agua), esta mezcla entre asfalto blando y asfalto rígido espumado permiten reducir la viscosidad y mejorar la tabajabilidad de la mezcla.

En la Tabla 4 se muestran valores típicos de temperaturas y dosificaciones de aditivos o agua que se requieren en mezclas tibias así como los países en los que se utilizan.

Tabla 4 - Valores de Referencia de WMA

Procesos de mezclas tibias	Producto	Compañía	Descripción	Dosificación de aditivo	País donde se usa esta tecnología	Temperatura de producción (°C)
Proceso de Espumado						
Contenido de agua	Aspha-Min	Eurovia and MHI	Tecnología con contenido de agua utilizando zeolitas	0.3% del peso total de la mezcla	Estados Unidos, Alemania, Francia y a nivel mundial	20-30
Contenido de agua	Advera	PQ Corporation	Tecnología con contenido de agua utilizando zeolitas	0.25% del peso total de la mezcla	Estados Unidos	10-30
Basados en agua	Double barrel green	Astec	Espumado basado en agua	2% de agua por masa de bitumen y un agente anti "stripping"	Estados Unidos	116-135
Basados en agua	Ultrafoam GX	Gencor industries	Espumado basado en agua	1-2% de agua por masa de bitumen	Estados Unidos	No se especifica
Basados en agua	LT Asphalt	Nynas	Espumado con aditivo hidrofílico	0.5-1% por masa de bitumen	Holanda e Italia	90
Basados en agua	WAM-Foam	Shell and Kolo-Veidekke	Asfalto blando mezclado con asfalto duro	2-5% de agua por masa de asfalto duro	Mundial	100-120
Basados en agua	Low Energy Asphalt	LEACO	Agregados gruesos y calientes mezclados con arena fina y mojada	3% de agua con arena fina	Estados Unidos, Francia, España e Italia	<100
Basados en agua	LEAB	Royal Bam Group	Espumado directo con aditivo mezclado con los agregados bajo punto de ebullición	0.1% del peso del bitumen y un aditivo de ahdeción		
Orgánico						
FT Wax	Sasobit	Sasol	Cera Fischer-Tropsch	Aproximadamente 2.5% por peso de bitumen en alemania, 1.0-1.5% en Estados Unidos	Alemania y otros 20 paises	20-30
Montan Wax	Asphaltan B	Romonta GmbH	Cera Montan refinada con ácido	2.0-4.0% por masa de bitumen	Alemania y otros 20 paises	20-30
Ácido graso-Cera	Licomont BS	Clariant	Ácido graso	3.0% por masa de bitumen	Alemania y otros 20 paises	20-30
Qímico						
Químico	Tecnología Evoterm	Mead Westvaco	Paquetes químicos con y sin agua	0.5% por masa de emulsión de bitumen. La emulsión contiene 70]% de bitumen	Mundial	85-115
Químico	Cecabase RT	CECA	Paquete químico	0.2-0.4% por peso de la mezcla	Estados Unidos y Francia	30
Químico	Rediset	Akzo Nobel	Aditivo orgánico y surfactantes catiónicos	1.5-2% por peso de bitumen	Estados Unidos y Noruega	30
Químico	Revix	Mathy-Ergon	Ceras y agentes activos de superficie con polímeros	No se especifica	Estados Unidos	15-25
Químico	Iterlow T	IterChimica		0.3-0.5% por masa de bitumen	Italia	120

Fuente: (Rubio et al., 2012)

En relación con el diseño de la mezcla Rubio et al. (2012) destacan que depende de la ubicación geográfica. Puesto que en Estados Unidos desde su desarrollo e implementación alrededor de 1990 predomina el diseño «SuperPave» en tanto que en Europa se utiliza el diseño «Marshall» y como las dos metodologías han sido exitosamente utilizadas en el diseño de esta clase de mezclas, en la selección de agregados se sigue el mismo procedimiento que se utiliza para las mezclas calientes. Los aditivos deben ser seleccionados por parte del fabricante así como también la temperatura mínima de mezcla y en atención a las temperaturas de mezcla y compactación se eligen en función de garantizar un adecuado cubrimiento de los agregados y una buena trabajabilidad en la mezcla.

2.2. Comportamiento reológico de mezclas elaboradas mediante la técnica de espumado

Rubio et al. (2012) en su investigación indican que el comportamiento a corto plazo de las mezclas tibias fue tan bueno como el de las mezclas en caliente, destacando que las mezclas tibias presentan una mayor facilidad al instalarse, su facilidad para agregar RAP en su mezcla y los beneficios económicos presentados en la Tabla 5.

Tabla 5 - Beneficios ambientales WMA

	Vaikus et al. (Vaitkus et al., 2009a,b)	Bueche, N. (Bueche, 2009)	Larsen, O.R. (Larsen, 2001)	D'Angelo et al. (Vaitkus et al., 2009a,b)	Página web de Evotherm
CO_2	30-40%	30-40%	31%	15-40%	46%
SO_2	35%	-	-	20-35%	81%
VOC	50%	50%	50%	50%	30%
CO	10-30%	-	-	10-30%	63%
NOx	60-70%	-	-	60-70%	58%
Polvo	20-25%	-	-	25-55%	-

Fuente: (Rubio et al., 2012)

Rubio et al. (2012) también resaltan las desventajas de las mezclas asfálticas tibias como son su susceptibilidad al ahuellamiento, las fuertes regulaciones que tiene este tipo de mezclas, susceptibilidad a la humedad y la falta de investigación en mayor profundidad con relación a su comportamiento a largo plazo.

Precisamente en el comportamiento reológico de las mezclas tibias se centró la investigación realizada por parte de (Yu et al., 2013), evaluando mediante ensayos de desempeño a bajas temperaturas, susceptibilidad a la temperatura y resistencia a la fatiga. Para las diferentes pruebas utilizaron un asfalto modificado SBS (styrene-butadine-styrene) y un asfalto sin modificar, las mezclas fueron elaboradas con 1, 2 y 3% de agua a 30°C para el espumado, el asfalto sin modificar fue calentado a 150°C en tanto que el asfalto modificado fue mezclado a una temperatura de 170°C.

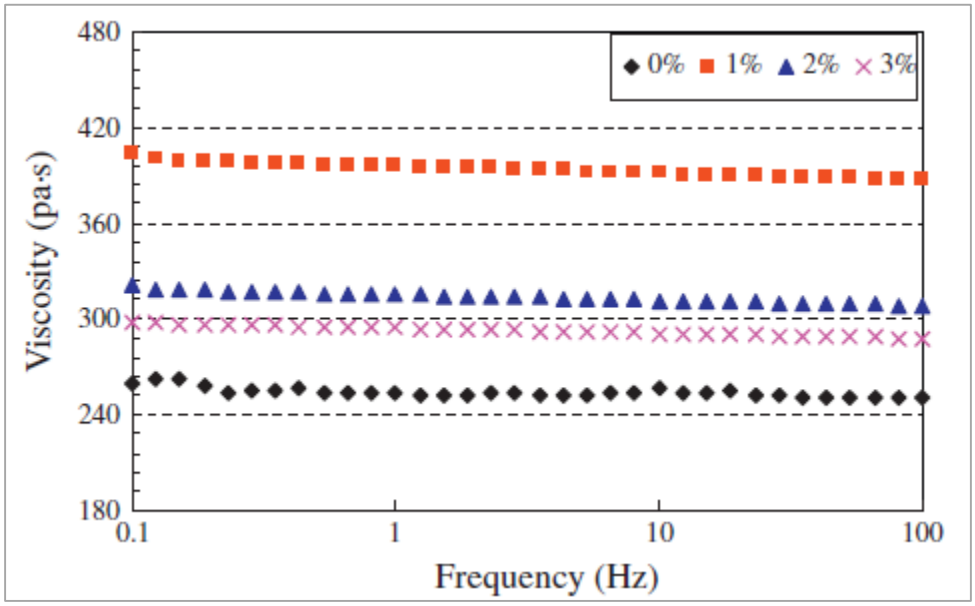


Figura 2 – Viscosidades en función del contenido de agua de espumado

Fuente: (Yu et al., 2013)

Tabla 6 - Viscosidades en función del contenido de agua de espumado

Asfalto espumado No modificado	Zero Shear Viscosity (Pa s)	
Contenido de agua	0%	259.4
	1%	103.5
	2%	320.9
	3%	297.3

Fuente: (Yu et al., 2013)

Según los datos de la Figura 2 y de la Tabla 6 se puede apreciar la gran diferencia entre el asfalto no espumado (0% de agua) y el asfalto con 1% de agua a pesar de verse claramente que en la medida en que se aumenta el porcentaje de agua de espumado la viscosidad decrece (sin que alcance el mismo valor del asfalto sin espumar), razón por la cual los autores señalaron que el agua de espumado (especialmente en dosificaciones de 1%) parece mejorar la resistencia al ahuellamiento de las mezclas asfálticas (con asfalto no modificado).

En cuanto a la susceptibilidad a la temperatura, se realizaron pruebas de módulo y pérdida de módulo obteniendo los resultados presentados en la Figura 3 y la Figura 4.

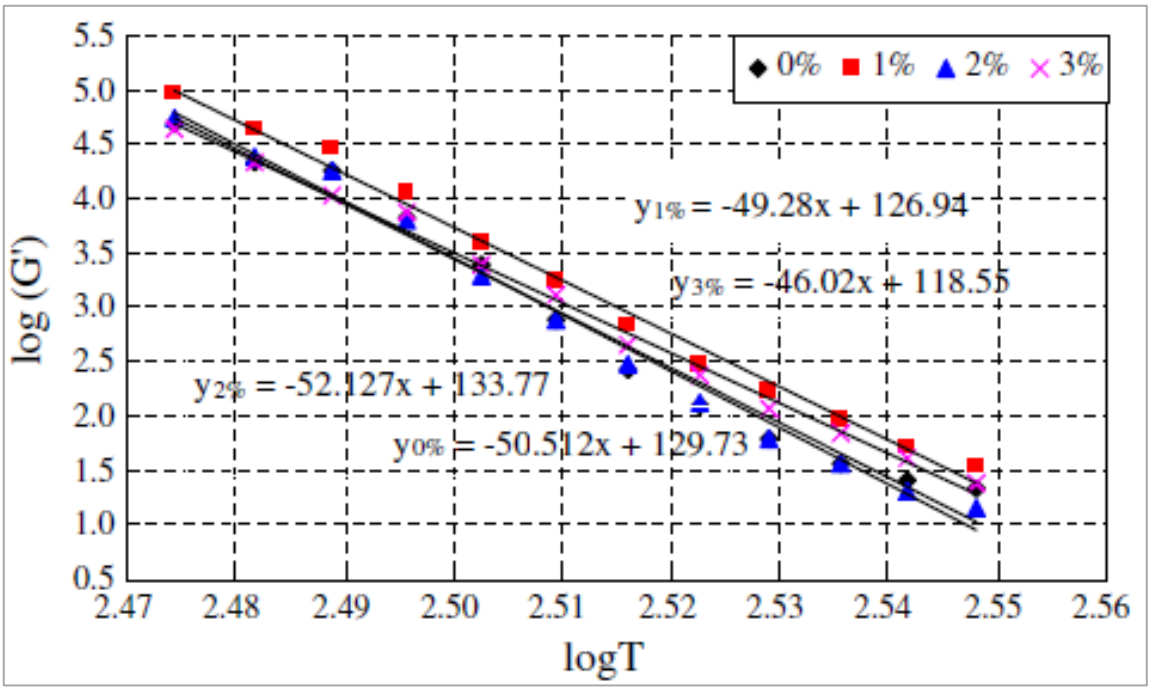


Figura 3 –Módulo del asfalto espumado vs temperatura

Fuente: (Yu et al., 2013)

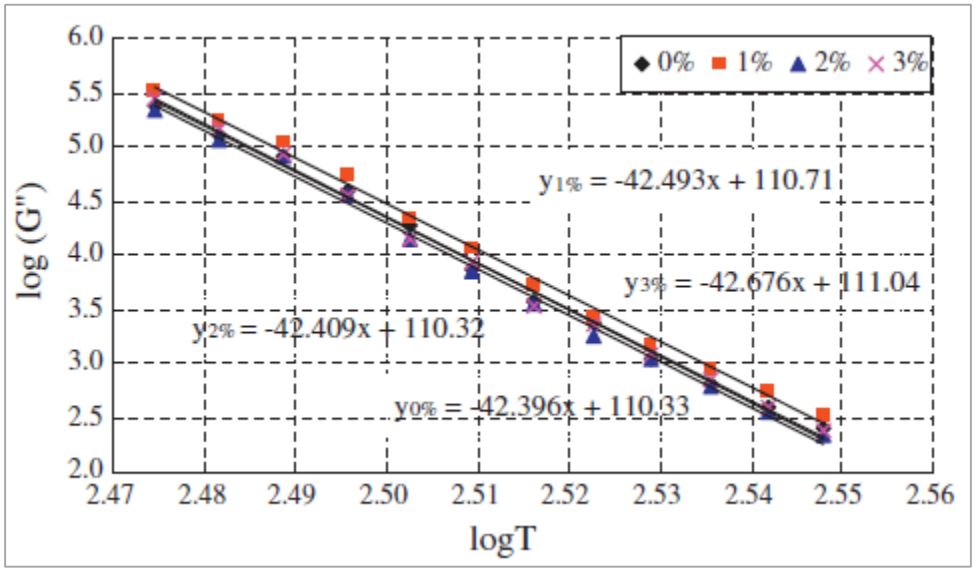


Figura 4 – Pérdida de módulo del asfalto espumado vs temperatura

Fuente: (Yu et al., 2013)

Con estos resultados los autores señalaron que si bien la sensibilidad a la temperatura se redujo al agregar un 1% de agua a la mezcla, al incrementar este contenido de agua hasta un 3% la sensibilidad se volvió aún más alta que la del asfalto no espumado; sin embargo en cuanto a la pérdida de módulo parece no estar relacionada con el espumado ni la cantidad de agua de espumado, lo que condujo a las siguientes observaciones:

1- El contenido de agua afecta más a la parte elástica que a la parte viscosa del asfalto.
2- El uso de 1 y 2% de agua para espumado disminuye la sensibilidad a la temperatura.

Las mezclas fueron expuestas a un proceso de envejecimiento mediante RTFO (Rolling thin-film oven) y calcularon el factor de fatiga cada 5°C en un rango comprendido entre los 10-50°C, los resultados se muestran en la Tabla 7 y en la Figura 5.

Tabla 7 – Temperaturas de fatiga de las mezclas envejecidas

Mezcla asfáltica tibia con espumado		Temperaturas de fatiga (°C)
Contenido de agua	0%	19.04
	1%	18.54
	2%	19.82
	3%	20.13

Fuente: (Yu et al., 2013)

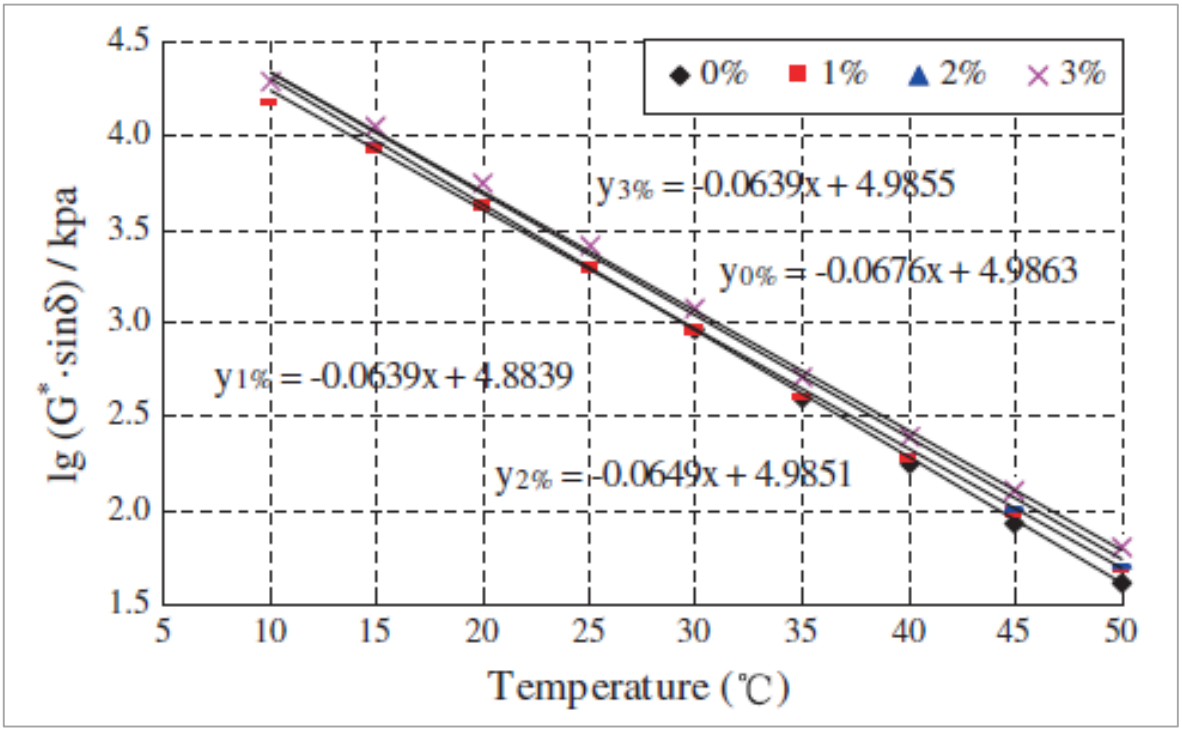


Figura 5 –Factor de fatiga vs Temperatura

Fuente: (Yu et al., 2013)

De esta forma Yu et al.(2013) observaron que al adicionar un 1% de agua para espumado la temperatura de fatiga decrece y que al aumentar la cantidad de agua de espumado la temperatura de fatiga aumenta, razón por la cual señalan que un contenido de agua entre el 2 y el 3% favorece la resistencia a la fatiga.

Considerando aspectos como la carga por tráfico, el calor, la luz, etc. y como los mismos influyen en el desempeño del pavimento envejeciendo el asfalto, endureciéndolo y aumentando su fragilidad, demostraron que a pesar de esto el envejecimiento a corto

plazo produce un efecto benéfico en el desempeño de las mezclas asfálticas, razón por la cual recomendaron utilizar agentes «envejecedores» con el fin de aumentar así su resistencia a la humedad como se observa en la Figura 6:

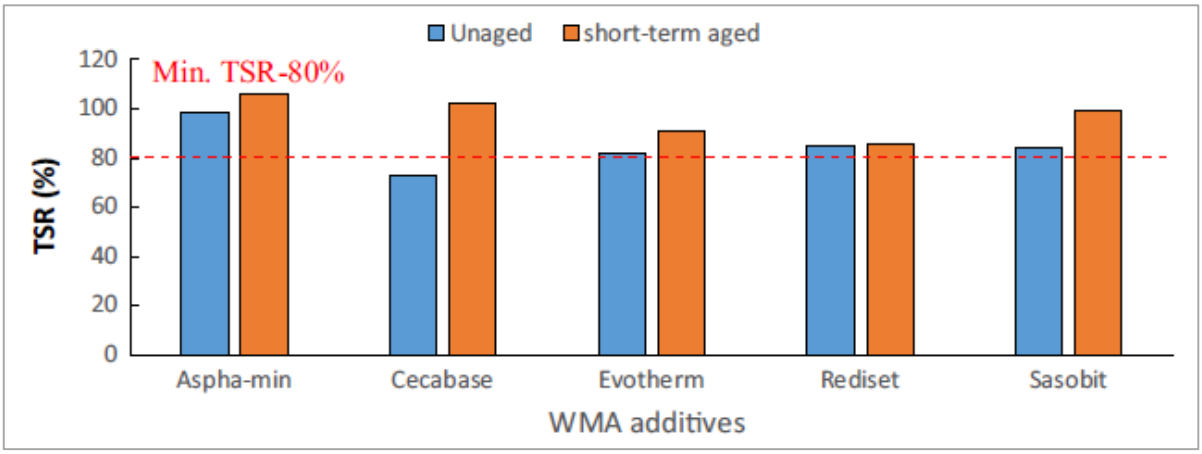


Figura 6 – TSR de Mezcla sin envejecer vs Mezcla envejecida

Fuente: (Xu et al., 2017)

Al realizar una comparación en la susceptibilidad a la humedad variando la temperatura de compactación, Xu et al., (2017) encontraron que, como era de esperarse las mezclas con menor temperatura de compactación obtuvieron menores resistencias a la humedad debido a un menor envejecimiento de la mezcla por su baja temperatura de producción, una mayor cantidad de vacíos y una humedad residual en los agregados, como se puede observar en la Figura 7:

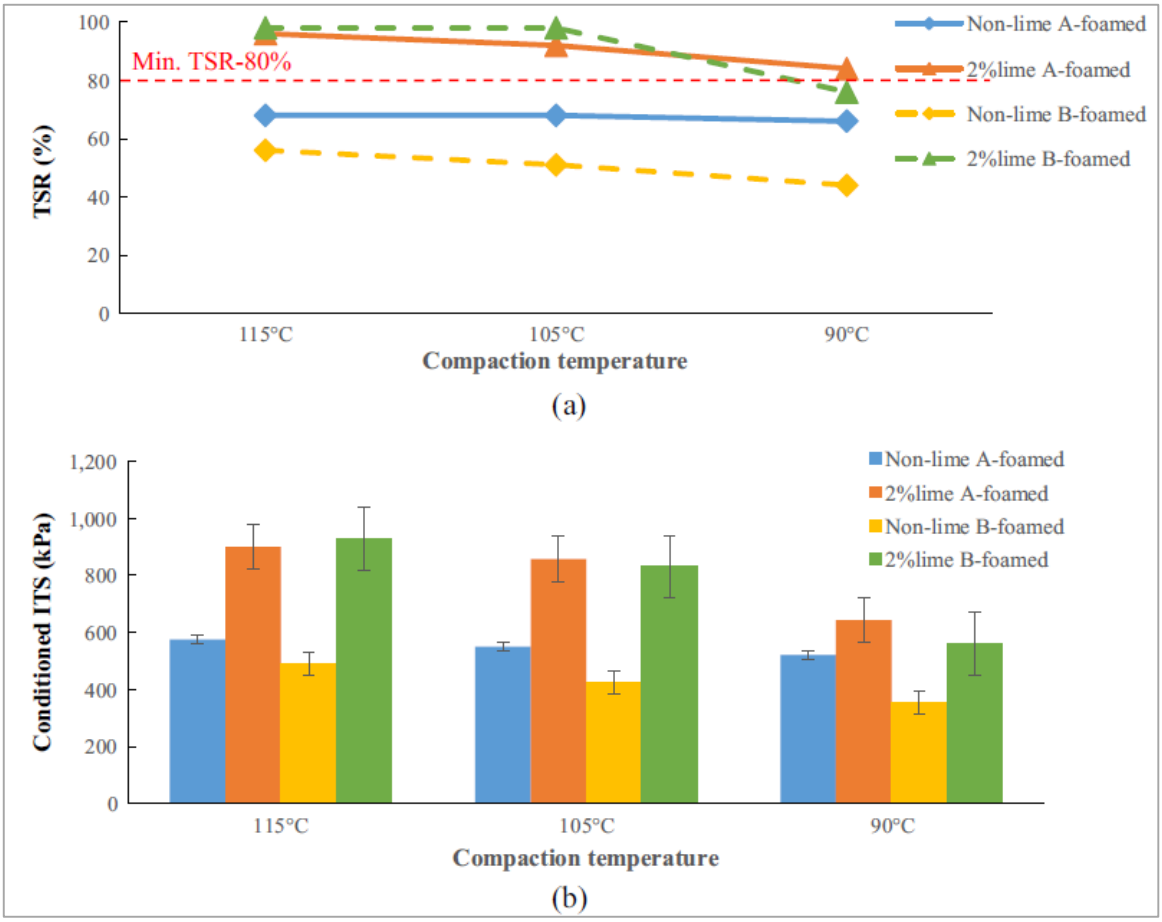


Figura 7 - Efectos de la temperatura de compactación en la susceptibilidad a la humedad

Fuente: (Xu et al., 2017)

Cuando evaluaron el efecto del agua del espumado en la resistencia a la humedad encontraron que esta tiene un efecto entre aceptable y despreciable como se muestra en la Tabla 8, en la que se puede observar como la mayor pérdida de resistencia fue del 20% (valor máximo permitido) y en alguno casos fue nulo.

Tabla 8 - Efecto del agua de espumado en la resistencia a la humedad

Contenido de agua de espumado (%)	Tracción Indirecta en seco (kPa)		Tracción Indirecta húmeda	
	Grava	Caliza	Grava	Caliza
1.8	1310-1379	1448-1517	80-85%	80-85%
2.2	172-1241	1379-1448	100%	80-85%
2.6	1241-1310	1310-1379	95-100%	85-90%

Fuente: (Xu et al., 2017)

Respecto a las mezclas tibias siempre existe una cuestión relacionada a la humedad que poseen los agregados utilizados en su elaboración y que debido a la baja temperatura de mezclado puede permanecer sin evaporarse produciendo así problemas de adhesión entre los agregados y el asfalto, por este motivo Yang et al. (2018) realizaron un estudio del efecto de la humedad residual en las propiedades de adhesión con mezclas tibias. Inicialmente tomaron agregados procedentes de canteras locales en Taiwán, esta canteras trabajaban con Argilita (AG), Areniscas (SD) y Pizarra (SL) y los principales componentes de estos agregados se presenten en la Tabla 9, donde se puede observar que la argilita es un agregado ácido y las areniscas y pizarras son agregados intermedios puesto que no son ni ácidos ni alcalinos.

Tabla 9 - Minerales que componen los agregados utilizados

Constituyente (%)	Argilita (%)	Arenisca (%)	Pizarra (%)
SiO_2	58.82	78.33	60.64
TiO_2	0.73	0.25	0.73
Al_2O_3	16.46	4.77	17.32
Fe_2O_3	1.1	1.07	2.25
FeO	7.2	0.33	3.66
MnO	0.09	-	-
MgO	4.92	1.16	2.6
CaO	0.76	5.5	1.54
Na_2O	4.03	0.45	1.19
K_2O	1.6	1.31	3.69
H_2O	3.84	1.63	4.13
P_2O_5	0.17	0.08	-
CO_2	0.01	5.03	1.47
SO_3	0.01	0.07	-
BaO	-	0.05	0.38
S	0.05	-	-

Fuente: (Yang et al., 2018)

Durante la elaboración de las mezclas Yang et al.(2018) utilizaron un aditivo químico (con una proporción de 0.5%) para mejorar el cubrimiento de los agregados, la compactación y la trabajabilidad y un aditivo orgánico (con una proporción de 2.5%) el cual es soluble en el asfalto a una temperatura de 115°C que ayuda a reducir la viscosidad del asfalto. En la preparación de los agregados se tuvo en cuenta que se utilizarían tres distintos tipos de humedad (0, 5 y 10%), los agregados inicialmente fueron calentados en un horno a 135°C durante 6 horas, posteriormente fueron pesados y sumergidos en agua en una cámara de vacío por 30 minutos e interpolando el peso con respecto a los agregados totalmente secos se determinó el peso que deberían tener para cumplir con las humedades objetivo.

Para determinar la energía de adhesión entre las partículas y el asfalto se utilizó la máquina MTS Tabletop 858 con el montaje presentado en la Figura 8. Inicialmente se elaboraron especímenes que posteriormente fueron cortados en trozos de 2cm x 2cm x 1cm y pegados con alúmina y calentados en horno a 135°C por una hora, este ensayo presenta gran similitud con el ensayo CPA que describe la norma INV-E232

diferenciándose del mismo en que el objetivo de este es comprobar la energía requerida para separar al agregado de la mezcla asfáltica.

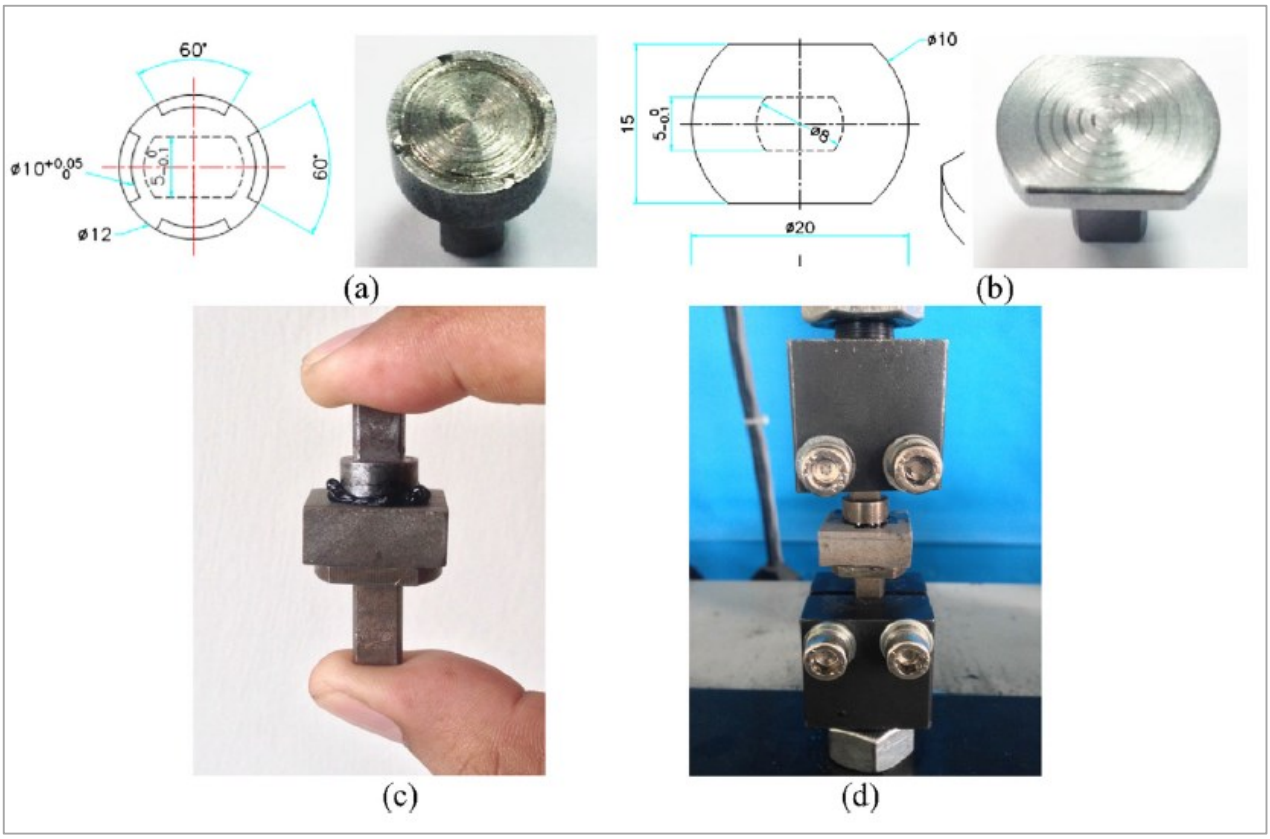


Figura 8 - Montaje de la máquina MTS Tabletop 858

Fuente: (Yang et al., 2018)

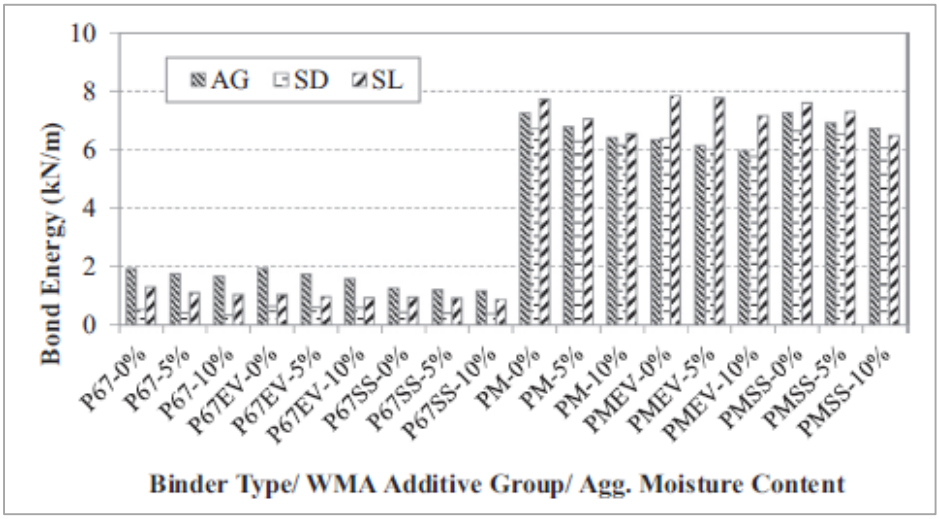


Figura 9 - Resultados de la prueba en la MTS Tabletop 858

Fuente: (Yang et al., 2018)

Los resultados obtenidos arrojaron un comportamiento que está dividido en dos grupos como los son los asfaltos con P67 y los modificados con polímeros (PM) presentados en la Figura 9. A pesar de la mayor acidez de la AG estas obtuvieron mayores energías de adhesión, independientemente del contenido de agua y del aditivo utilizado pero destacando que las mezclas con el aditivo químico y sin aditivo obtuvieron mejores resultados que las mezclas tratadas con el aditivo orgánico. Para el grupo del asfalto PM la acidez del agregado sí parece influir en la energía de adhesión, así como también influyó la humedad de los agregados y en una menor medida los aditivos utilizados.

El efecto de la humedad de los agregados es más fácilmente apreciable en la Figura 10 en donde se puede observar con claridad como independientemente del tipo de mezcla y el aditivo siempre el valor de fuerza de adhesión se reduce con el aumento en la humedad de los agregados.

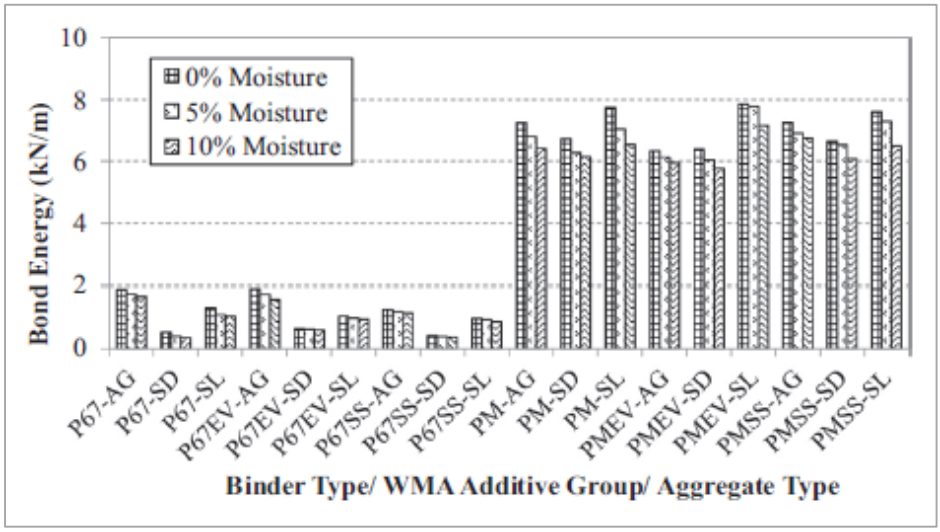


Figura 10 - Efecto de la humedad de los agregados en la adhesión

Fuente: (Yang et al., 2018)

Un parámetro adicional que puede ser calculado es el «Trabajo de adhesión» que es obtenido mediante la ecuación (1):

$W_{sl} = (1 + \cos\theta)\gamma_{lv}$ **[1]**

Donde

- W_{sl} → trabajo de adhesión en mN/m
- Θ → ángulo de contacto
- Υ_{lv} → la tensión en la superficie del líquido en contacto con el vapor

Los resultados del trabajo de adhesión se presentan en la Figura 11, donde se aclara como la reducción de este parámetro va de la mano con el aumento en la humedad de los agregados utilizados, independientemente del tipo de asfalto utilizado, del tipo de agregado y del aditivo empleado. Sin embargo, se debe recalcar que en humedades bajas el agregado a base de arenisca se comportó mucho mejor pero que en humedades altas el agregado más ácido y que normalmente es el menos recomendable, obtuvo el mejor desempeño. Por otra parte nuevamente el aditivo químico presento un mayor y mejor impacto respecto del aditivo orgánico y el tipo de asfalto parece no tener ningún efecto en este parámetro.

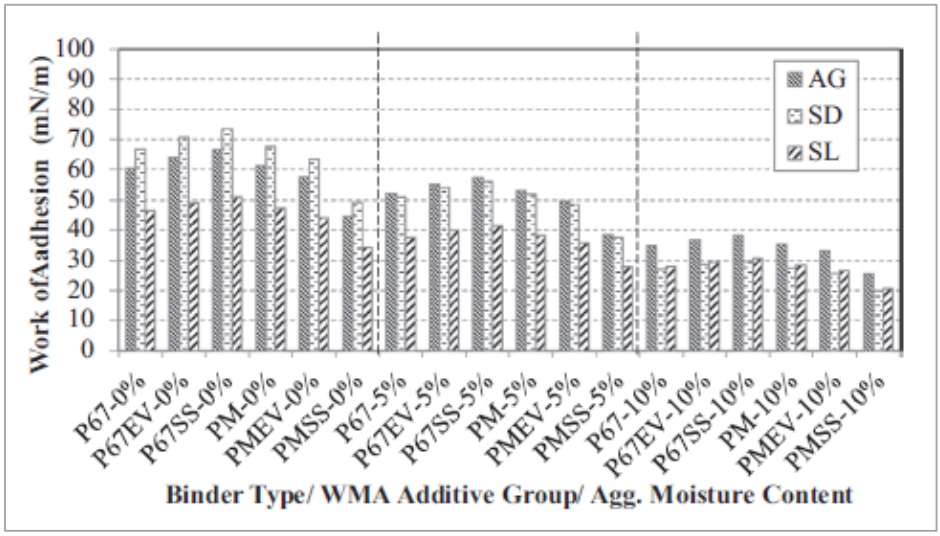


Figura 11 - Trabajo de adhesión asfalto-agregados en función del contenido de humedad de los agregados

Fuente: (Yang et al., 2018)

Por lo tanto los resultados obtenidos en este estudio coinciden con las observaciones realizadas por Rubio et al. (2012), Capitão et al. (2012) y Xu et al. (2017) respecto al efecto de la humedad residual de los agregados en las mezclas asfálticas tibias debido a las bajas temperaturas de producción.

En cuanto a la resistencia a la humedad de las mezclas tibias hay que destacar que en la investigaciones realizadas por Rubio et al.(2012), Capitão et al.(2012) y Xu et al. (2017) se señala que en razón de las bajas temperaturas de producción de las mezclas la humedad contenida en los agregados genera problemas de adhesión entre los mismo y el asfalto de la mezcla.

Mogawer et al. (2018) también elaboraron mezclas utilizando tecnologías tibias de espumado pero con una cantidad de agua del 3% por cantidad de asfalto, al igual que Xie et al. (2017) determinaron que la cantidad de agua utilizada en el espumado no afecta la mezcla y además concluyeron que la humedad del RAP y de los agregados vírgenes es eliminada durante el proceso de producción de la mezcla. Gracias a un análisis del módulo del asfalto del material virgen, del material reciclado y posteriormente de la mezcla del asfalto reciclado y el virgen, llegaron a la conclusión que indica una baja efectividad en la mezcla de estos dos materiales; es decir que es

muy complejo conseguir un mezclado efectivo, sin embargo, también indican como esta aparente deficiencia en el proceso de mezclado parece tener un efecto nulo en el comportamiento de las mezclas en laboratorio.

Una vez realizada la prueba TSR durante la investigación de Mogawer et al., (2018) se vio como a una mayor cantidad de RAP la susceptibilidad a la humedad aumentaba a diferencia de lo reportado por Zhao et al., (2013) pero todas las mezclas (29%, 39% y 48% RAP) cumplieron satisfactoriamente el requisito de resistencia a la humedad. Contrario a lo encontrado por Zhao et al., (2013) y en concordancia con lo reportado por Dong et al., (2017) calcularon detrimentos en la resistencia a la fatiga al aumentar la cantidad de RAP, sin embargo se debe destacar que Zhao et al., (2013) utilizaron una cantidad de RAP máxima del 30% y que debido a esto pudo existir esta diferencia en los comportamientos de las mezclas analizadas en cada uno de los estudios. El estudio concluye señalando que mezclas tibias con una cantidad de RAP de hasta el 50% presentan un comportamiento aceptable en laboratorio.

Por su parte, Xu et al. (2017) hicieron una revisión de los principales aspectos que influyen en la resistencia a la humedad en las mezclas tibias resaltando que el método más utilizado para determinar este parámetro está basado en el TSR (Tensile Strength Ratio). La susceptibilidad a la humedad está dada por la falla en la adhesión entre las partículas del agregado y el asfalto, lo que reduce la resistencia a la tracción, la rigidez y la durabilidad de la carpeta asfáltica destacando que en el caso de las mezclas tibias existen tres factores que influyen en esta resistencia como lo son: los aditivos utilizados, las condiciones de los agregados y el agua utilizada para el espumado.

El papel de los agregados es muy importante debido a que normalmente componen hasta un 95% de la mezcla, razón por la cual su rol es determinante. En la construcción de vías se utilizan distintos tipos de agregados como lo son granitos y basaltos que poseen un alto contenido de dióxido de sílice y la caliza que posee un porcentaje muy bajo de este componente. En la Figura 12 se muestra la composición química de los agregados mencionados anteriormente, la razón por la cual se destaca el contenido de dióxido de sílice es debido a que este elemento entorpece la interacción agregado-asfalto y por lo tanto las mezclas elaboradas con agregados alcalinos presentará una

mayor resistencia a la humedad en comparación con las mezclas elaboradas a partir de agregados ácidos.

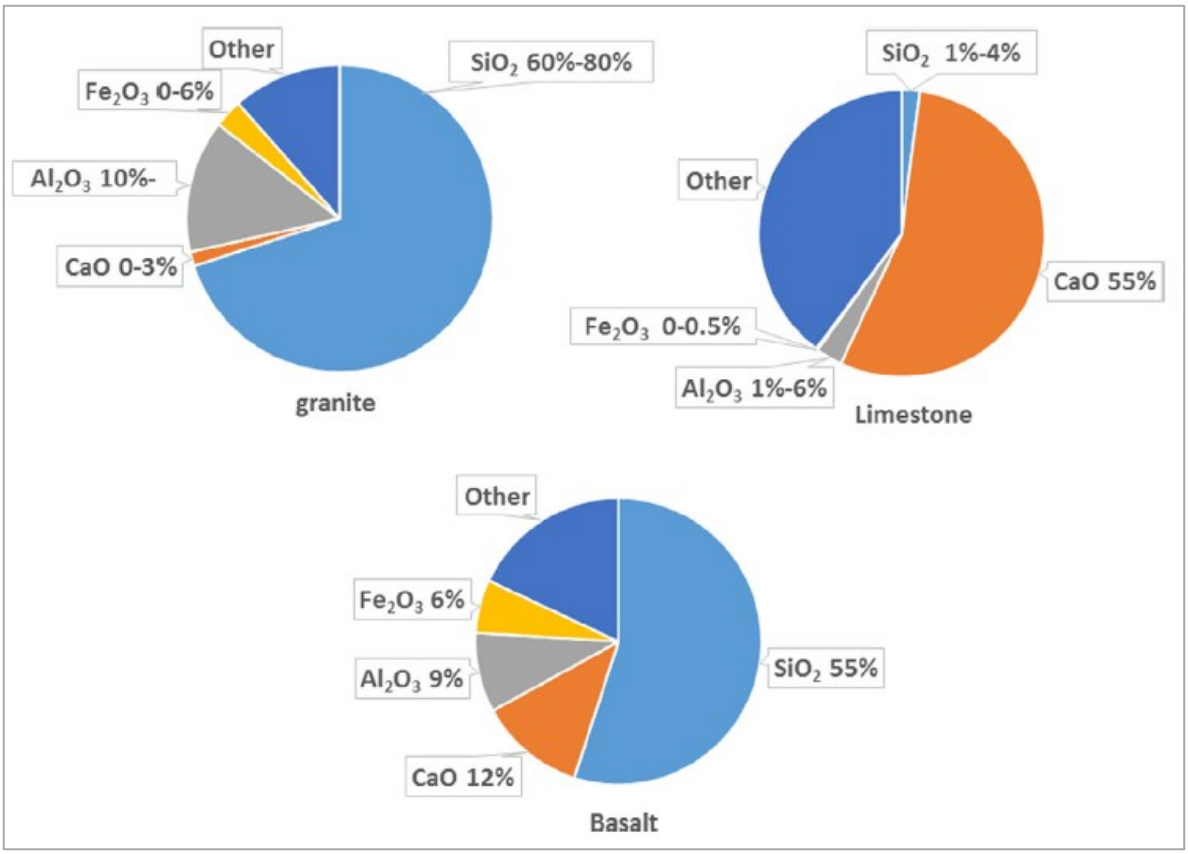


Figura 12 - Composición química de los principales agregados utilizados en construcción de vías

Fuente: (Xu et al., 2017)

Al determinar el efecto de la gradación de los agregados que componen la mezcla asfáltica encontraron que existen dos posiciones distintas, una que señala una ventaja dada por una gradación con una fracción fina mayor genera una cantidad de vacíos menor y por lo tanto una mayor resistencia a la humedad en razón de una impermeabilidad más alta y otra que resalta que las gradaciones de fracción fina al poseer una mayor área constaban de una «película» asfáltica más delgada recubriendo los agregados y por lo tanto una mayor susceptibilidad a la humedad, sin embargo durante su investigación encontraron que efectivamente las mezclas con gradaciones

finas registraron menores deformaciones permanentes como se puede observar en la Figura 13.

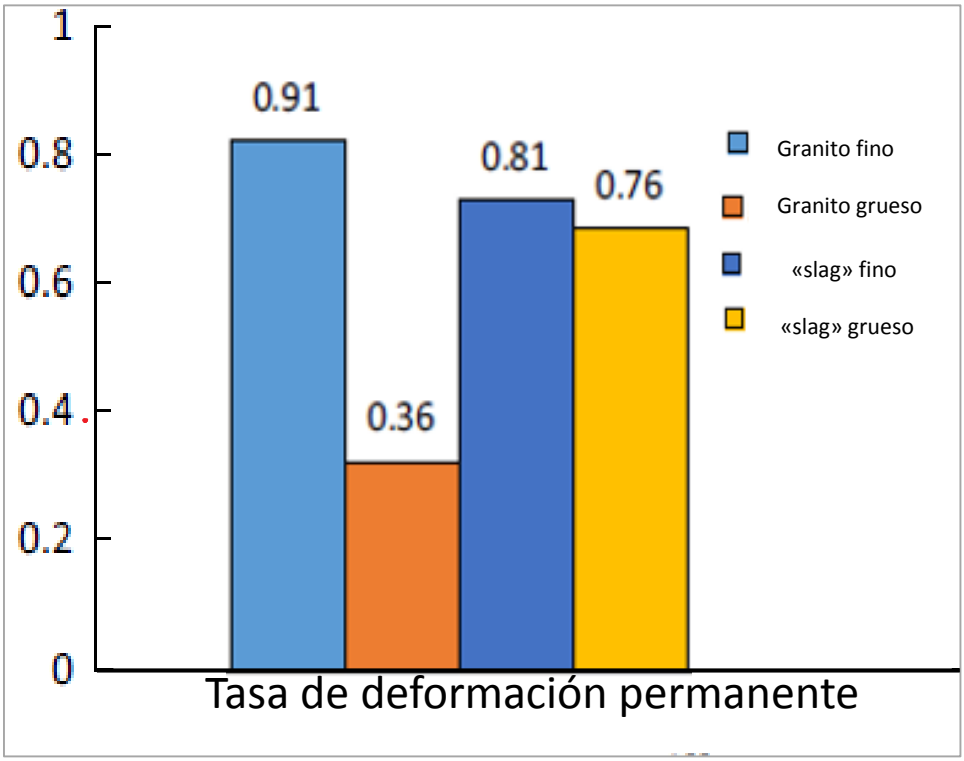


Figura 13 - Efecto de la gradación de los agregados en la deformación permanente de la mezcla.

Fuente: (Xu et al., 2017)

Al evaluar las mezclas tibias en relación con su resistencia a la humedad, Capitão et al. (2012) encontraron que este parámetro mejoró en gran manera cuando se añadió un 2% de cal hidratada como agente anti-stripping y que en general las mezclas tibias presentan menores resistencias a la tracción indirecta en comparación con las mezclas calientes de referencia. Por otro lado, en atención al módulo de rigidez, este se reduce en la medida en que se reduce la temperatura de la mezcla, esta puede llegar a ser incluso de un 50% al reducir tan solo 20°C en la temperatura de elaboración de la mezcla. Sin embargo, con aditivos orgánicos y una zeolita junto con una temperatura de producción de comprendida entre 100 y 140°C, el módulo obtenido fue superior al de las mezclas calientes de referencia. Al evaluar las mezclas tibias en su resistencia a la fatiga encontraron que estas sufren más daño a bajo niveles de esfuerzo en

comparación con las mezclas calientes; sin embargo, son menos sensibles al aumento del nivel de esfuerzos por lo que pueden resultar ser más ventajosas en el uso de pavimentos con altos niveles de servicio. Finalmente, acerca del desempeño de las mezclas tibias en temperaturas extremas encontraron lo siguiente:

- Temperaturas muy bajas (de 0 a -20°C «para fractura») las mezclas tibias obtuvieron resistencias iguales e incluso mejores que las mezclas calientes de referencia.
- Temperaturas muy altas (de 50 a 60°C «resistencia a la deformación permanente») se evidenció como las mezclas tibias presentaron un menor desempeño en este parámetro asociado a una menor rigidización debido a la menor temperatura de elaboración de la mezcla, lo que produce menos oxidación del material bituminoso.

2.3. Ventajas medioambientales y económicas del asfalto espumado

Haciendo énfasis en el impacto ambiental de las mezclas tibias que incorporan RAP Dinis-Almeida & Afonso (2015) destacan las diferencias de temperaturas de producción y las asocian tanto al consumo de combustible como a la emisión de gases de efecto invernadero como se puede observar en la Figura 14. Se observa como a pesar de que el consumo de combustible en las etapas de secado y vaporización es similar, en la etapa de calentamiento es en donde se puede observar la mayor reducción de consumo de combustible, resultando en una reducción comprendida entre el 30 y el 40% en dióxido de carbono y una mayor comodidad para el personal encargado de la instalación de la carpeta asfáltica, en razón de una reducción del 30 al 50% en los gases provenientes de la mezcla asfáltica.

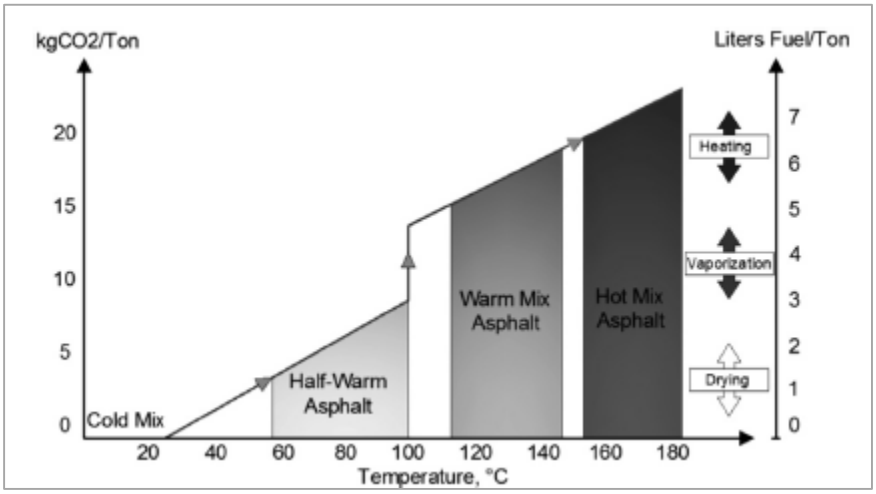


Figura 14 - Consumo de combustibles y emisiones de gases según tipo de mezcla asfáltica

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

Zaumanis et al. (2016) realizaron una evaluación de la reducción del impacto ambiental generado a partir del aprovechamiento de RAP, los resultados se presentan en la Figura 15.

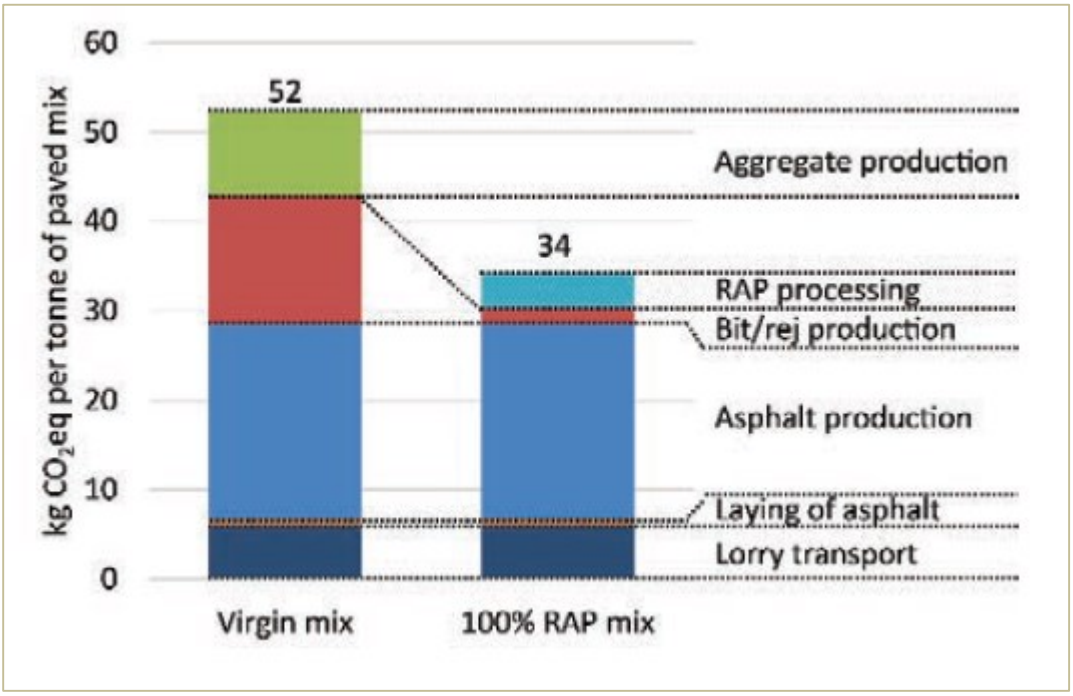


Figura 15 - Reducción del impacto ambiental por aprovechamiento del RAP

Fuente: (Zaumanis et al., 2016)

Por otro lado, en lo que respecta al impacto económico aclararon que debido a la fluctuación del precio de los materiales y sobre todo del asfalto (al estar sujeto al costo del petróleo), los ahorros estarán sujetos a la ubicación del proyecto, los materiales requeridos, el momento del desarrollo y tecnología utilizada, teniendo como referencia costos en New Jersey a mediados del año 2014 concluyendo que mezclas con 100% de RAP pueden reducir los costos entre un 50 y 70%, tal y como se puede apreciar en la Figura 16.

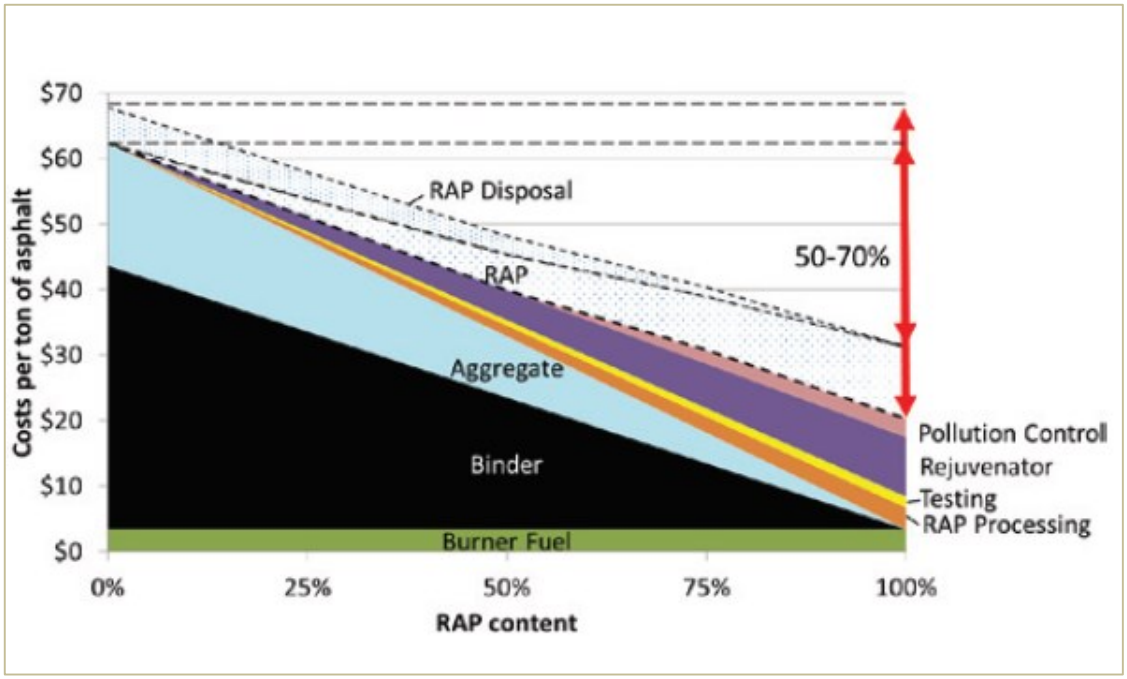


Figura 16 - Reducción de costos por aprovechamiento de RAP

Fuente: (Zaumanis et al., 2016)

La conclusión más importante de esta investigación se centra en señalar que es posible elaborar mezclas asfálticas para capas superiores de la estructura de pavimento con 100% de RAP que presenten comportamientos similares a los de las mezclas calientes tradicionales.

Según Lyubarskaya et al. (2017) el 70% del costo de las actividades de mantenimiento de las vías corresponde al costo de los materiales requeridos para la realización de estas actividades, razón por la cual el desarrollo de la utilización de RAP responde a necesidades tanto económicas como medioambientales, puesto que el aprovechamiento del RAP reduce el requerimiento de materiales nuevos con el subsiguiente ahorro que se presenta en la Tabla 10.

Tabla 10 - Relación %RAP-Beneficio (USD)

Proporción de material reciclado (RAP) in mezclas asfálticas	Reducción de costos de materiales utilizados para rehabilitación del pavimento (dólares por tonelada)
15%	3.4

Proporción de material reciclado (RAP) in mezclas asfálticas	Reducción de costos de materiales utilizados para rehabilitación del pavimento (dólares por tonelada)
25%	5.5
40%	6.8

Fuente: (Lyubarskaya et al., 2017)

Otras de las ventajas de la utilización del RAP se dan durante el proceso de fresado y se mencionan a continuación:

- Remoción de capas asfálticas deterioradas
- Previene la acumulación de sobrecapas de carpetas asfálticas
- Ayuda a prevenir que el nivel de la vía iguale al de los andenes
- Restaura le perfil del pavimento mejorando el IRI
- Mejora la textura de la superficie de rodadura mejorando el agarre

Por su parte Capitão et al. (2012) desarrollaron una investigación con el fin de dar una visión general acerca de las tecnologías tibias y sus características, que aparte de las ventajas mencionadas por Rubio et al. (2012) destacan que al producirse menos gases de efecto invernadero y material particulado en el aire es más fácil que las plantas de mezclas tibias sean ubicadas cerca de las zonas urbanas y que al requerir menor temperatura de compactación pueden ser fácilmente instaladas, con climas fríos y poco favorables para mezclas calientes; sin embargo no sólo se centraron en las ventajas que las mezclas tibias tienen frente a las mezclas calientes sino que por otro lado también destacaron los puntos en los que superan a las mezclas frías, a saber que presentan un mejor cubrimiento de los agregados y no requieren tiempo de curado ni capas de sellante antes de abrirse al público.

Así mismo, Capitão et al. (2012) señalan que existen algunas desventajas como lo son el requerimiento de más maquinaria y también en algunos casos el uso de aditivos, lo que puede generar sobrecostos a pesar del ahorro generado por el uso de menores temperaturas. Así mismo existe la posibilidad de que la reducción de emisiones sea compensada e incluso superada por las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de los procesos de producción de los aditivos que pueden llegar a requerir algunas mezclas tibias. Como un punto intermedio, en razón de ser señalado como una característica inherente a las mezclas tibias que no es una ventaja y tampoco una

desventaja, señalaron que al poseer una menor cantidad de vacíos la mezcla tendrá un proceso oxidativo inferior y por lo tanto se endurecerá menos, siendo más susceptible al ahuellamiento; sin embargo, esto también afectará positivamente su durabilidad.

En referencia a las tecnologías de mezclas tibias con asfalto espumado, Capitão et al. (2012) mencionan que las fases de diseño pueden ser semejantes a las de una mezcla caliente y como los agregados pueden ser calentados a lo que denominaron una temperatura moderada (bajo 100°C) antes de mezclarlos con el asfalto espumado para mejorar las características de la mezcla asfáltica. También mencionan que la relación de expansión y su vida media (definida como el tiempo en el que el asfalto espumado pierde el 50% de su expansión) son los factores principales mediante los cuales se diseña una mezcla tibia. Por otra parte, indican como aspectos tales como la cantidad de agua para el espumado, el flujo de aire y la tasa de flujo del asfalto son aspectos que deben ser cuidadosamente controlados, para garantizar que la mezcla se elabore de manera adecuada. Se debe tener en cuenta que las mezclas tibias sirven para elaborar mezclas densas, modificadas con polímeros, con grano de caucho y con RAP entre otros.

La investigación de Capitão et al.(2012) concluyeron señalando que los costes de producción de las mezclas tibias y calientes (en cuanto a la extracción de materiales, transporte e instalación) son muy semejantes entre sí y que debido a su desempeño similar en los aspectos evaluados se pudo deducir que los costos de operación y mantenimiento también serán muy símiles.

2.4. Consideraciones de diseño y uso de mezclas tibias

Las mezclas tibias nacen de la necesidad de llevar a la industria de la producción del asfalto hacia una producción que impacte en menor medida al medio ambiente tal y como lo indican L. Abreu et al., (2017) quienes destacan que para realizar las mezclas de agregados y asfalto (que normalmente componen un 95 y 5% de la mezcla asfáltica respectivamente) el asfalto debe calentarse hasta una temperatura de 150°C lo que implica la emisión de gases de efecto invernadero (GHG) con sus implicaciones en el aumento de la temperatura del planeta y la salud de los seres que lo habitan. Por esta

razón se han desarrollado mezclas tibias que requieren temperaturas de elaboración que van desde los 100 a los 140 °C y que se pueden producir de las siguientes maneras:

- Usando aditivos orgánicos
- Usando aditivos químicos
- Espumado con agua

La investigación de L. Abreu et al., (2017) se centró en la manejabilidad del asfalto en función de la viscosidad del mismo, indicando que diferentes asfaltos pueden tener la misma viscosidad a diferentes temperaturas. En su estudio analizaron el comportamiento de un asfalto con una penetración de 160/200, el método de espumado seleccionado correspondió a espumado mecánico con agua (que es explicado en mayor detalle más adelante por otros autores) en el cual se inyecta aire (en esta caso con una presión de 550 kPa) y asfalto mediante unas boquillas (de 2mm de diámetro con capacidad de inyectar 50g de asfalto por segundo). A partir de los parámetros de relación de expansión y el valor de la viscosidad establecido como óptimo se puede obtener el «Foaming Índex» (índice de espumado), cuyo cálculo se explica con mayor detalle en el numeral 2.6, este índice indica la aplicabilidad de un asfalto para realizar espumado y los resultados obtenidos en relación a este parámetro durante esta investigación se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11 - Foaming Índex según temperaturas de mezclado y cantidad de agua

Temperatura (°C)	Contenido de agua (%)			
	2	3	4	5
140	585.54	553.21	590.2	572.52
150	687.19	739.76	635.55	611.12
160	395.66	444.09	459.3	457.91

Fuente: (L. Abreu et al., 2017)

Los resultados obtenidos por L. Abreu et al. (2017) muestran que a una temperatura de calentamiento del asfalto de 150°C y un contenido del 3% de agua utilizado durante el espumado se obtienen las mejores características de espumado. De manera complementaria se puede mencionar que la temperatura de 140°C obtuvo mejores

resultados que la temperatura de 160°C y que el contenido óptimo de agua para esta temperatura de mezclado fue de un 4%.

En cuanto a la viscosidad del asfalto utilizado en las mezclas existen consideraciones que representan dos posiciones distintas, por un lado se considera que los asfaltos de alta viscosidad generan una mejor adherencia con los agregados en tanto que los asfaltos de baja viscosidad serán susceptibles a fenómenos de stripping. Sin embargo, se considera que los asfaltos de alta viscosidad entorpecen la salida de agua de la mezcla asfáltica haciéndola más susceptible a la humedad.

Tomando un enfoque centrado en consideraciones para el diseño de mezclas tibias con RAP Sunarjono & Hidayati (2018) destacaron las ventajas medioambientales de las mezclas tibias utilizando RAP pero así mismo señalaron sus desventajas técnicas. Indicaron que más allá de las características que definen a una buena mezcla asfáltica (la durabilidad, resistencia a la fatiga, estabilidad, módulo de rigidez, porcentaje de vacíos y su trabajabilidad durante la mezcla y la compactación) destacaron que una mezcla asfáltica tibia elaborada por medio del espumado debe tener una tasa de expansión tan grande como sea posible y una vida media de la mayor duración viable para obtener una máxima calidad. Una vez elaboradas mezclas a distintas temperaturas (140, 160 y 180°C) determinaron que la temperatura más favorable fue la de 160°C puesto que presentó una expansión mayor a las de las otras temperaturas a pesar de que su vida media no fuera la más amplia como se puede ver en la Figura 17.

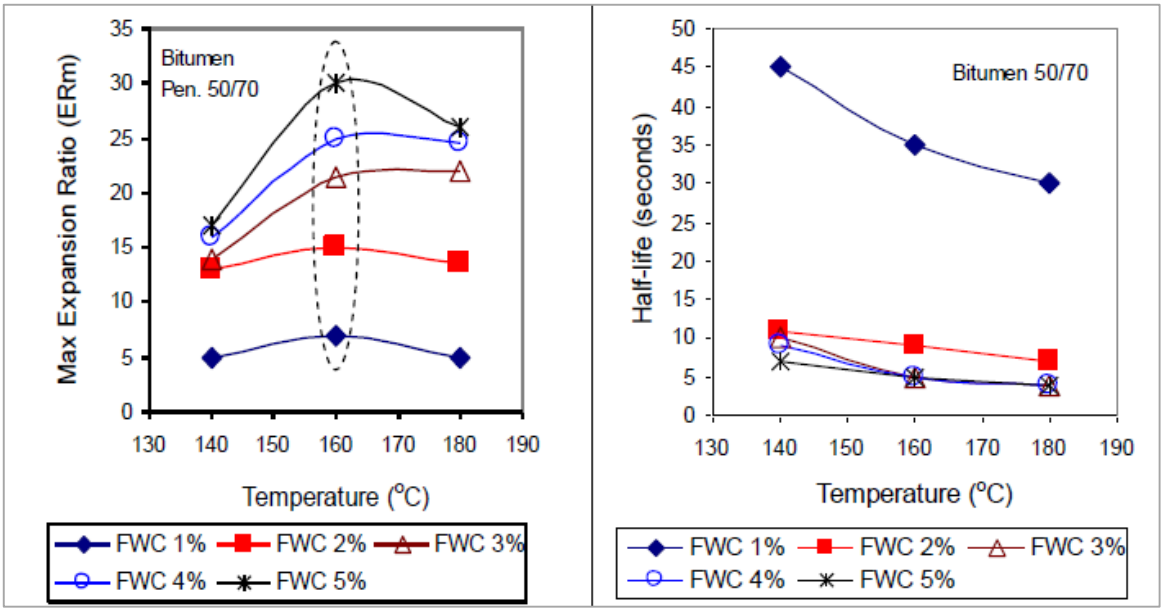


Figura 17 - Temperatura óptima de espumado WMA

Fuente: (Sunarjono & Hidayati, 2018)

En relación con la cantidad de agua para el proceso de espumado determinaron un porcentaje de 1.9% debido a que con este se obtiene una vida media de aproximadamente 10 segundos y al seleccionar este contenido de agua se obtiene el mayor valor de índice de espumado para la vida media que definieron como objetivo para su mezcla como se evidencia en la Figura 17. Posteriormente destacaron un pro y un contra de utilizar asfalto endurecido, a saber: un asfalto endurecido genera una mayor viscosidad de la mezcla y por tanto una mayor dificultad en su manejo e instalación, por otro lado otorga un mayor módulo a la mezcla dándole así una mejor estabilidad frente al paso de las cargas como se observa en las mediciones de ahuellamiento presentadas en la Figura 18.

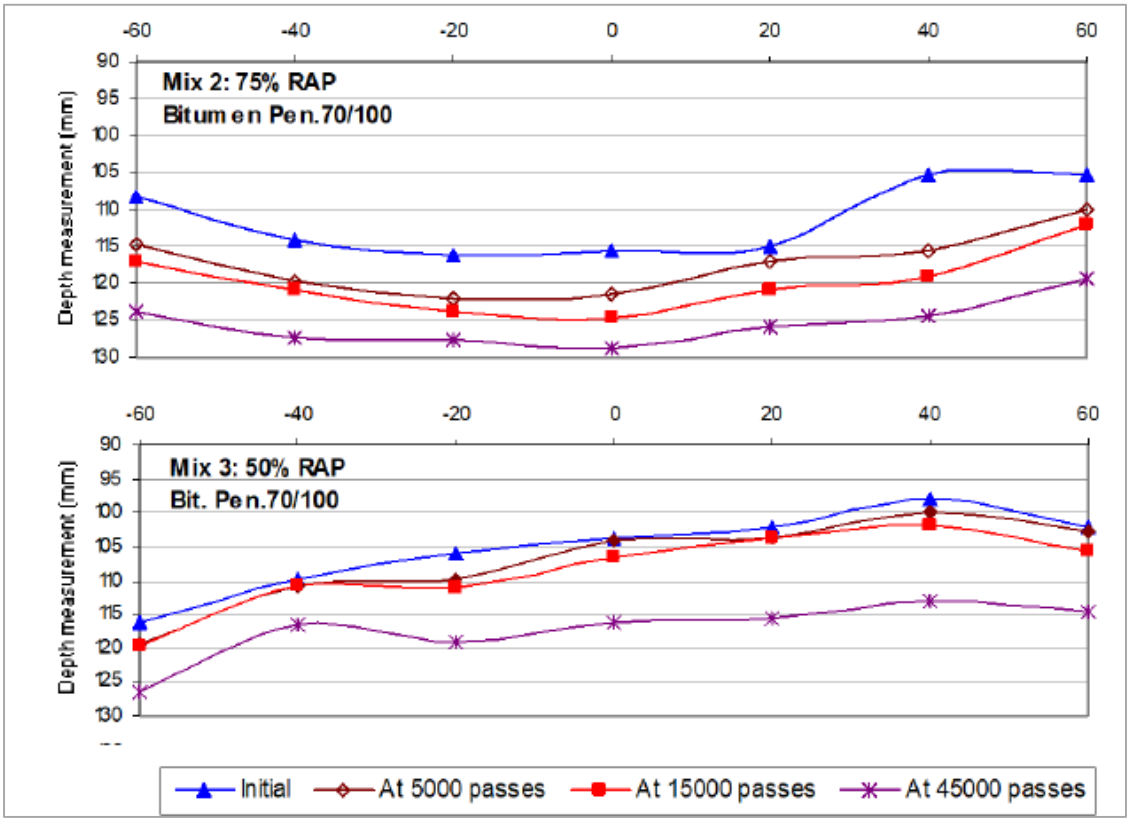


Figura 18 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP

Fuente: (Sunarjono & Hidayati, 2018)

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, Sunarjono & Hidayati (2018) recomiendan utilizar temperaturas de espumado comprendidas entre los 160 y 180°C y también indican que los materiales del RAP poseen menores densidades, gravedades específicas y características volumétricas de menor calidad debido a su mayor cantidad de vacíos.

Huang et al. (2016) a partir de los esfuerzos hechos en las recientes investigaciones relacionadas con la inclusión de grandes cantidades de RAP en mezclas asfálticas tibias destacaron las ventajas de esta práctica como lo son la reducción de la viscosidad de las mezclas, la reducción del envejecimiento del asfalto y las bajas temperaturas de elaboración que compensan la rigidez del asfalto envejecido del RAP, es debido a este último punto que consideraciones especiales deben hacerse a la hora de realizar mezclas con este material.

Con el fin de distinguir fácilmente el material RAP del material virgen, Huang et al. (2016) elaboraron dos mezclas, una con agregados vírgenes gruesos (Retenidos en el tamiz de 4.76 mm) con tamaños medios de RAP (pasan el tamiz de 16mm y se retienen en el tamiz de 2.38 mm) y agregados vírgenes medios con finos de RAP (pasa el tamiz de 2.38 mm), el porcentaje de RAP utilizado en las mezclas correspondió al 50%. Las mezclas se elaboraron siguiendo los siguientes parámetros:

- Temperatura de producción: 135°C.
- Contenido de agua: 2.5 y 5%
- Los agregados vírgenes fueron calentados a 145°C por dos horas y premezclados con el RAP calentado a 110°C por 30 minutos.
- El asfalto fue mezclado con los agregados a 135°C durante dos (2) minutos.
- La mezcla caliente de control fue elaborada a 165°C.

Una característica importante de un asfalto es su viscosidad puesto que de esta depende que sea más fácil o difícil de mezclar con los agregados y compactar, en atención a esto Huang et al. (2016) determinaron la viscosidad de la mezcla tibia encontrando que las lecturas de viscosidad no fueron estables ni siquiera después de 30 minutos, razón por la cual no pudieron utilizar los resultados obtenidos, sin embargo señalaron que después de un examen visual la viscosidad del asfalto espumado fue semejante a la de la mezcla caliente de control y con una menor viscosidad al de las mezclas tibias elaboradas con aditivos.

Para las mezclas tibias con agregados vírgenes gruesos (VG) y material RAP medio (RM) se muestran en la Figura 19, en esta se observa que las mezclas tibias con espumado obtuvieron tasas de mezclado similares a las de las mezclas calientes de control puesto que la mezcla tibia elaborada con 5% de agua obtuvo una tasa de mezclado igual a la de la mezcla caliente elaborada a 16°C, en tanto que la mezcla tibia producida con un 2.5% de agua obtuvo una tasa de mezcla incluso superior.

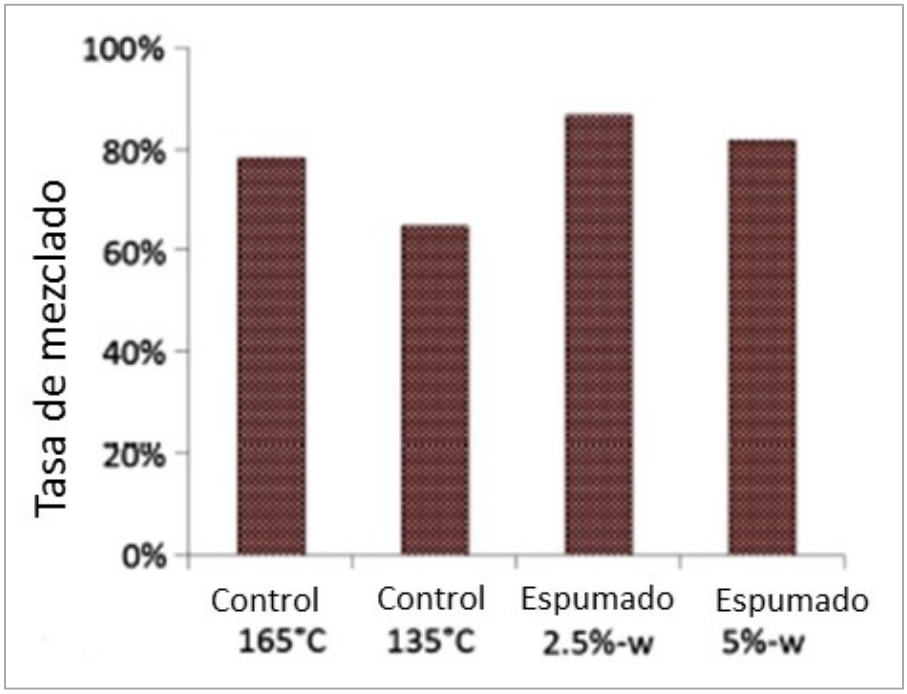


Figura 19 - Tasa de mezclado VG-RM

Fuente: (Huang et al., 2016)

Por otro lado los resultados de las mezclas elaboradas con agregados vírgenes medios (VM) y finos de RAP (FR) se muestran en la Figura 20, con respecto a estos valores Huang et al. (2016) señalan que las tasas de mezclado de las mezclas tibias fueron similares a los de la mezcla caliente de control elaborada a 165°C.

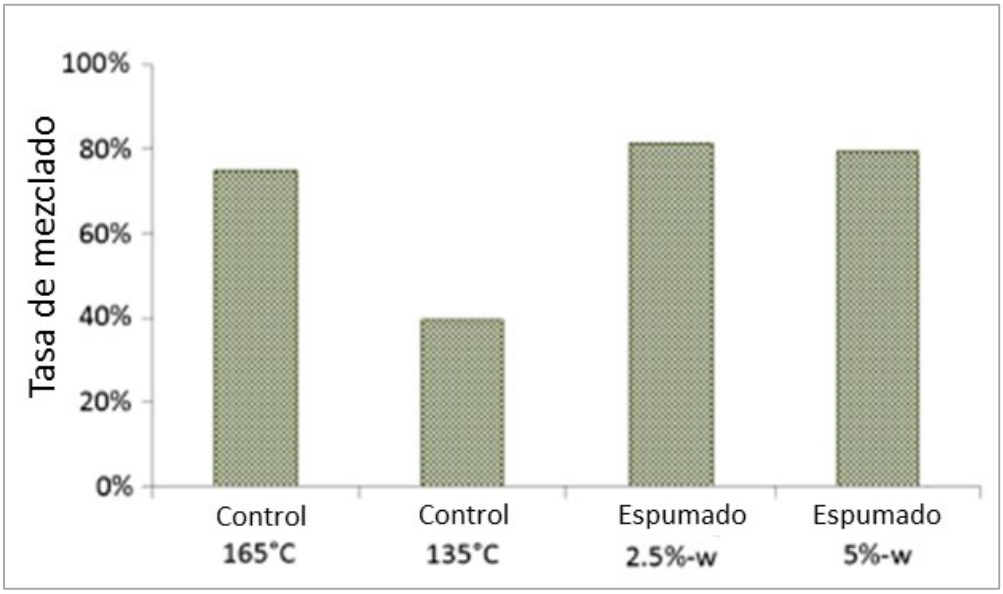


Figura 20 - Tasas de mezclado VM-RF

Fuente: (Huang et al., 2016)

Una conclusión muy importante de este estudio señala que las mezclas tibias con tecnología de espumado presentan una mayor facilidad para incluir material RAP y obtener una buena manejabilidad basados en los resultados obtenidos en los análisis de mezclado.

2.5. Comparación de Mezclas Tibias (WMA) y Mezclas Calientes Tradicionales (HMA).

Mazumder et al. (2016) realizaron todo un proceso para generar un «Life Cycle Inventory» (LCI) de las mezclas calientes, el cual consiste en el análisis de las diferentes fases que involucra la construcción y operación de un pavimento asfáltico como son, en términos generales:

- Construcción:
    - Explotación de la materia prima
    - Transporte de la materia prima a las plantas procesadoras
    - Procesamiento y elaboración de la mezcla asfáltica
    - Transporte de la mezcla asfáltica al lugar de obra
    - Instalación y compactación de la mezcla asfáltica

- Operación
- Mantenimiento
- Rehabilitación

Una vez realizado el inventario cuantificaron los impactos de las mezclas calientes según las categorías presentadas en la Tabla 12 y la Figura 21:

Tabla 12 - Life Cycle Inventory para la producción, construcción, mantenimiento y operación de vías con HMA.

Categoría de Impacto	Área de Impacto de la categoría	Unidad de Factor de Caracterización	Total (por km)
Agotamiento de minerales	Bitumen y agregados	Toneladas de minerales	1000
Agotamiento de combustibles fósiles		GJ	1515315.5
Calentamiento global		kg CO_2-eq (100 años)	102655250.3
Acidificación		kg SO_2-eq	1723305.6
Formación de foto-oxidación		kg C_2H_4-eq	321113.4
Toxicidad humana	Emisiones al aire	kg 1.4-diclorobenzeno-eq	5601943.25
	Emisiones al agua fresca	kg 1.4-diclorobenzeno-eq	34295.213
Eco toxicidad	Emisiones al aire	kg 1.4-diclorobenzeno-eq	20475
	Emisiones al agua fresca	kg 1.4-diclorobenzeno-eq	7646.61
Eutrofización		kg PO_4-eq	299250.16
Polvo		kg/ton	280236.8038
Agotamiento de espacios para rellenos		m^3	2.24E-06

Fuente: (Mazumder et al., 2016)

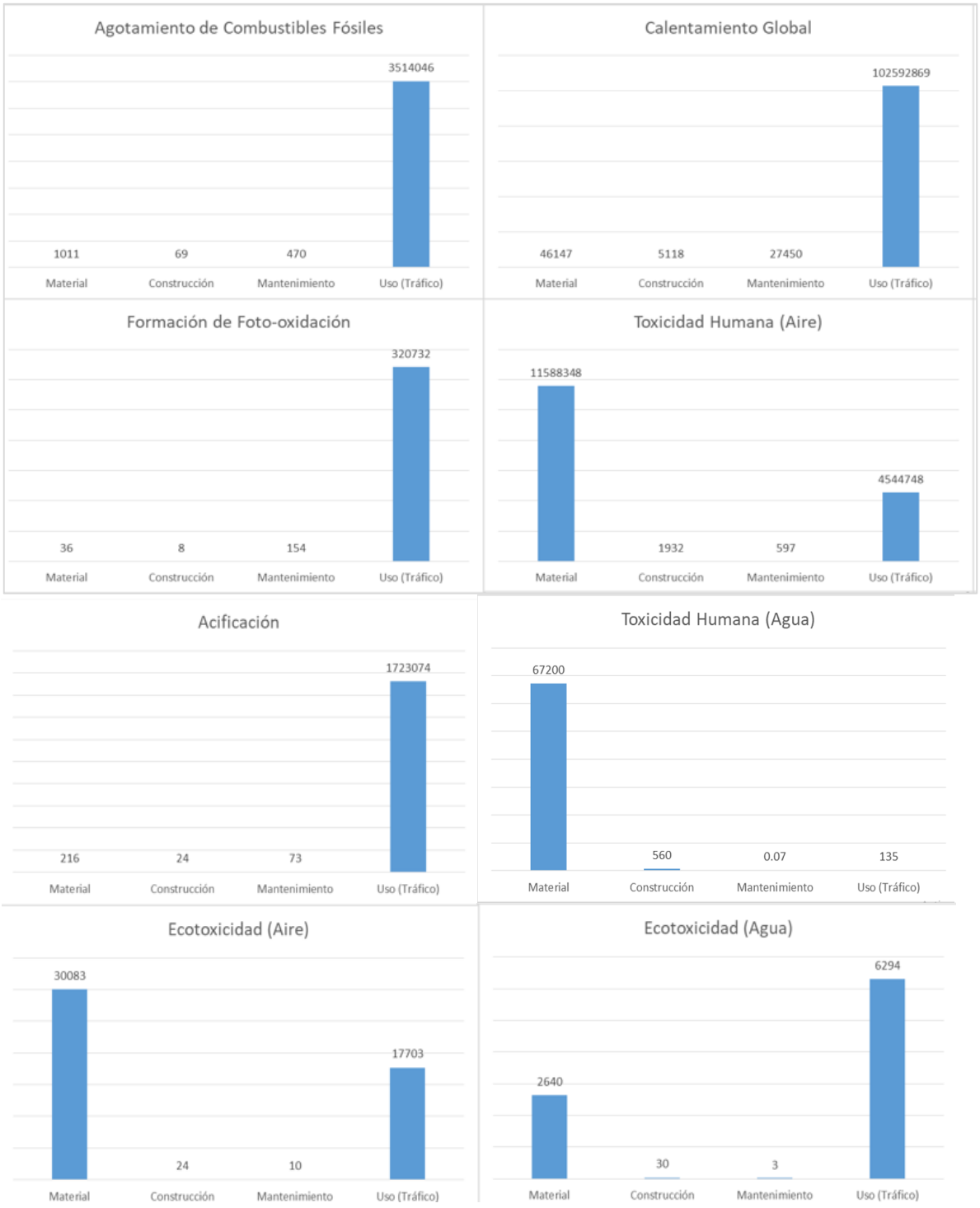


Figura 21 - Life Cycle Inventory HMA

Fuente: (Mazumder et al., 2016)

Una vez determinados estos valores, procedieron a estimar el impacto que tienen las mezclas tibias en comparación con las mezclas calientes tradicionales. En la Tabla 13 se resumen las principales diferencias, en la Tabla 14 se presentan los factores de reducción al utilizar WMA y en la Figura 22 los porcentajes de mejora que se derivan del uso de mezclas tibias

Tabla 13 - Diferencias de consumos entre HMA y WMA

Categoría de Impacto	Unidad del Factor de Caracterización	HMA	WMA
Agotamiento de combustibles fósiles	GJ	1010.62	754.95
Calentamiento global	kg CO_2-eq (100 años)	46147	34102
Acidificación	kg SO_2-eq	215.68	152.7
Formación de foto-oxidación	kgC_2H_4-eq	35.61	26.57

Fuente: (Mazumder et al., 2016)

Tabla 14 – Reducción porcentual de emisiones WMA vs HMA

Componentes de las emisiones de HMA	Reducción debido al uso de WMA	Inventario del ciclo de vida de WMA (LCI de HMA x Factor)
CO	8	x0.92
NOx	60	x0.4
CO_2	35	x0.65
SO_2	25	x0.75
VOC	50	x0.5

Fuente: (Mazumder et al., 2016)

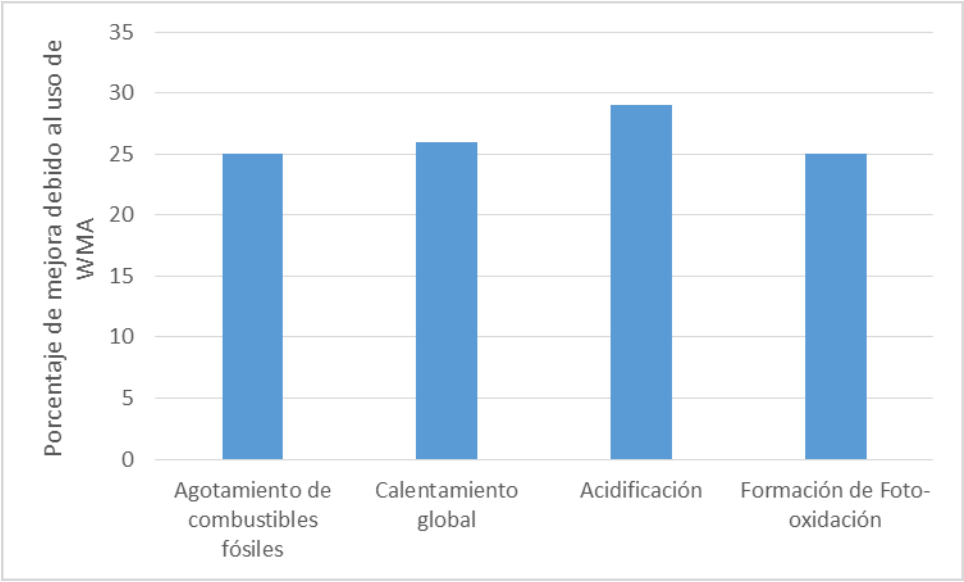


Figura 22 - Reducción del impacto ambiental en diferentes aspectos al usar WMA

Fuente: (Mazumder et al., 2016)

L. P. F. Abreu et al. (2017) concluyen que las WMA presentan menores emisiones de gases de efecto invernadero, menor acidificación, consumo de combustibles y menor fotoxidación del ambiente reduciendo el impacto medioambiental generado por estos procesos en un 25%.

Rondón et al. (2015) presentaron valores de reducción de emisión de gases de efecto invernadero y cenizas que se consiguen al elaborar mezclas tibias en lugar de mezclas calientes y que a continuación se mencionan:

- Reducción de CO_2: 30-40%
- Reducción de SO_2: 35%
- Reducción de compuestos orgánicos volátiles: 50%
- Reducción de CO: 10-30%
- Reducción de NO_x: 60-70%
- Reducción de cenizas: 20-25%

2.6. Mezclas Tibias y RAP.

Buss et al. (2015) examinaron distintos proyectos viales en la ciudad de Iowa que fueron construidos con material reciclado y distintas tecnologías de mezclas tibias, tal y como se puede ver en la Tabla 15:

Tabla 15 - Proyectos estudiados por Buss et al. (2015)

Código	Año	Nombre de la ruta	Localización del proyecto	Número del proyecto	Tecnología de WMA	Grado del asfalto	RAP (%)	RAS (%)
Floyd	2009	U.S route 218	Charles city, IA Bypass	NHSX-218-9(129)-3H-34	Aditivo químico	64-28	17	-
Marcus	2009	Iowa HWY 143	North of Marcus, IA	STP-143-1(4)-2C-18	Fischer-Tropshc wax	64-22	20	-
Warren	2009	U.S Route 65	SB Lanes of US 65 North of Indianola, IA	STP-065-3(57)-2C-91	Espumado	64-22	20	-
Tama	2010	Country HWY E67	East of Laurel, IA	STP-S-C064(110)-SE-64	Aditivo químico	64-22	20	-
Clayton	2010	Iowa HWY 13	South of Strawberry Point, IA	MP-013-2(704)59-76-22	Aditivo químico	64-22	5	-
Muscaine-0	2010	U.S route 61	North bound lanes	HSIPX-061-4(107)3L-70	Aditivo químico	58-28	20	-
Muscaine-5	2010	U.S route 61	between Muscatine, IA	HSIPX-061-4(107)3L-70	Aditivo químico	58-28	13	5
Muscaine-7	2010	U.S route 61	andBlue Grass, IA	HSIPX-061-4(107)3L-70	Aditivo químico	58-28	6	7

Fuente: (Buss et al., 2015)

En la Figura 23 se muestra una comparación entre los resultados obtenidos por las mezclas calientes y las mezclas tibias con espumado:

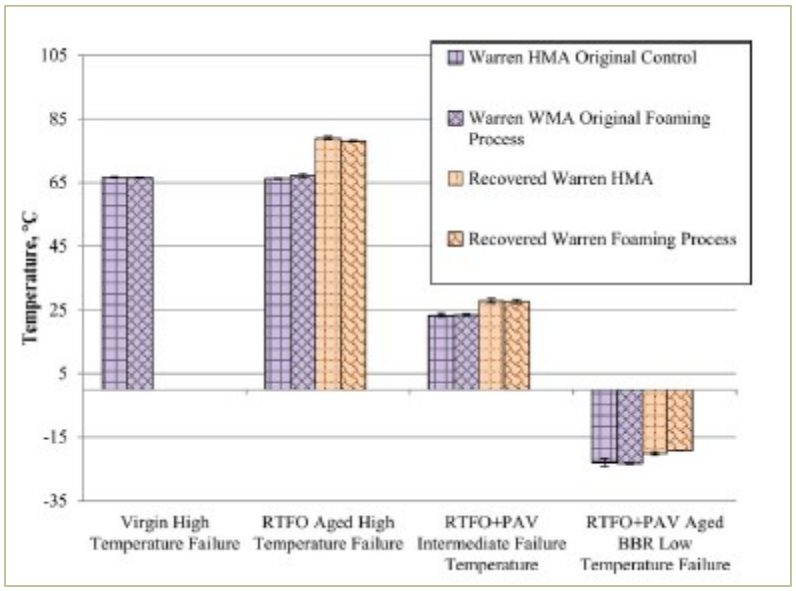


Figura 23 – Comportamiento de mezclas HMA vs WMA-FA

Fuente: (Buss et al., 2015)

Como se puede observar en la Figura 23, después de 5 años de servicio las mezclas tibias con 20% de RAP aún cumplían con los requerimientos de calidad del asfalto, puesto que tanto las mezclas calientes como las tibias fueron elaboradas con asfalto PG-64-22, a pesar de esto se debe destacar que si bien obtuvieron menores

resistencias a las altas temperaturas en comparación con las mezclas calientes, sus resistencias a bajas temperaturas fueron superiores.

Durante la investigación encontraron que si bien las mezclas tibias fueron equiparables con las mezclas calientes, las mezclas con espumado exhibieron mayores densidades, lo que indica que presentan mejores compactibilidades y una mejor inclusión de material reciclado.

Ding et al., (2016) propusieron evaluar la eficiencia de mezclado del asfalto del RAP y el material virgen mediante un análisis de Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), se evaluaron las principales suposiciones hechas durante el uso de RAP que son las siguientes:

a) El asfalto del RAP se mezcla por completo con el asfalto virgen cubriendo en un 100% la totalidad de los agregados (del RAP y vírgenes).
b) En la teoría de la roca negra se asume que el RAP se comportará meramente como un agregado. H.R. Soleymani, R. McDaniel, M. Abdelrahman, M. Anderson, Investigation of the black rock issue for recycled asphalt mixtures, Asphalt Paving Technol. (2000), señalaron que esta teoría no es aplicable puesto que en la totalidad de los casos se da al menos una mezcla parcial del asfalto virgen y el del RAP y que con contenidos altos de RAP (40%), la mezcla se comportó de forma similar a la mezcla de la primera suposición.
c) En el tercer escenario se supone que se dará una mezcla parcial entre los asfaltos involucrados.

Durante la investigación se examinaron 3 tipos de mezclas, HMA con rejuvenecedor, HMA sin rejuvenecedor y WMA-FA y 50% de RAP.

Para la evaluación de la eficiencia en el mezclado de los asfaltos, es necesario evaluar el «índice de envejecimiento» (AI) calculándolo con la siguiente ecuación:

$$AI = \frac{\text{área de carbonil } (aprox.1695\ cm^{-1})}{\text{área de carbono saturada } (aprox.1455 cm^{-1})} \qquad \textbf{[2]}$$

Donde:

Área de carbonil → Medida en longitud de onda utilizada para medir la oxidación del asfalto por procesos químicos dados entre el asfalto y el oxígeno de la atmósfera.

Área de carbono saturada → Longitud de onda que permanece constante independientemente al comparar un asfalto virgen vs el mismo asfalto envejecido

Basándose en este parámetro se puede medir la efectividad de la mezcla entre los dos asfaltos, al determinar el AI de la mezcla como se muestra en la Figura 24:

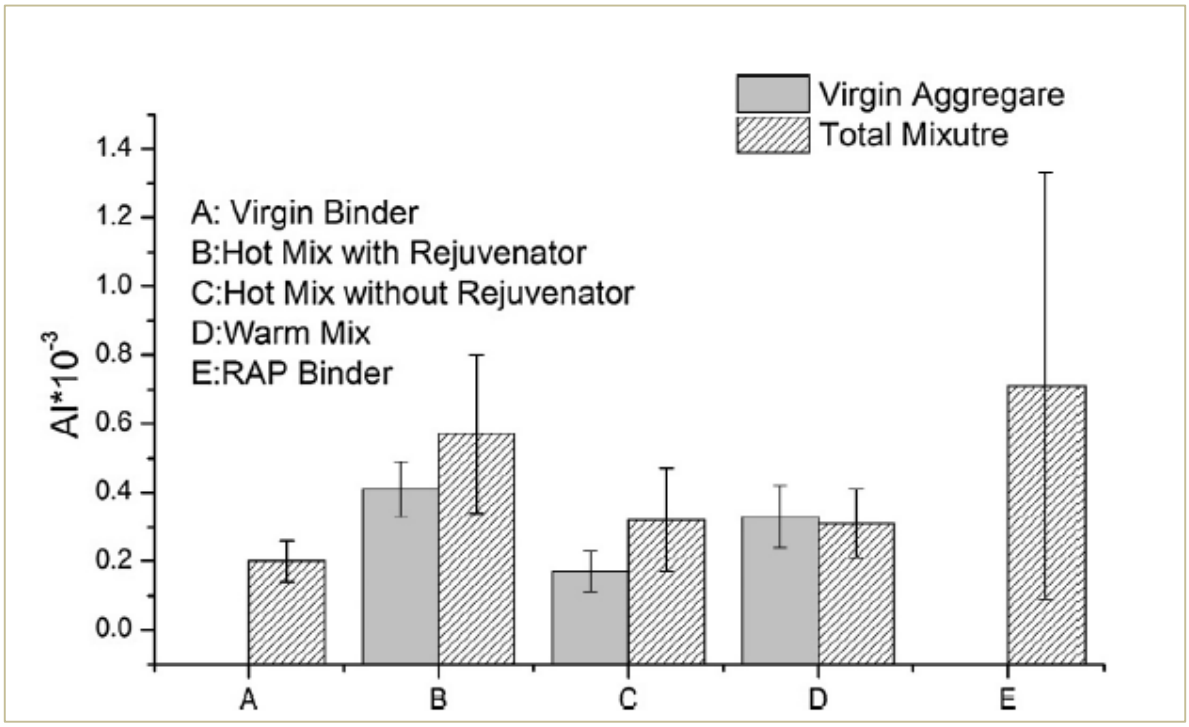


Figura 24 - Índice de envejecimiento de las mezclas

Fuente: (Ding et al., 2016)

Para la elaboración de la Figura 24 se mezclaron agregados vírgenes y aquellos provenientes del RAP con la mezcla entre el asfalto virgen y el asfalto envejecido, posteriormente se identificaron los agregados (según su procedencia entre virgen y RAP) y se realizó la extracción del asfalto que los cubría para posteriormente determinar los AI, como se puede observar los agregados de la mezcla tibia

presentaron los AI más similares, es decir, la WMA-FA presentó la mejor mezcla entre asfalto virgen y asfalto envejecido.

Para complementar la interpretación del AI se valieron del «coeficiente de significancia», Este parámetro sale de la comparación entre el índice de envejecimiento inicial del asfalto reciclado con el índice de envejecimiento de la mezcla elaborada con material reciclado y virgen, por lo tanto, un coeficiente de significancia bajo será indicativo de una alta variabilidad, puesto que si la relación entre la oxidación inicial y la final varía poco, se debe a que la mezcla de asfalto no fue efectiva. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, en la Figura 25 se muestran los coeficientes de significancia obtenidos:

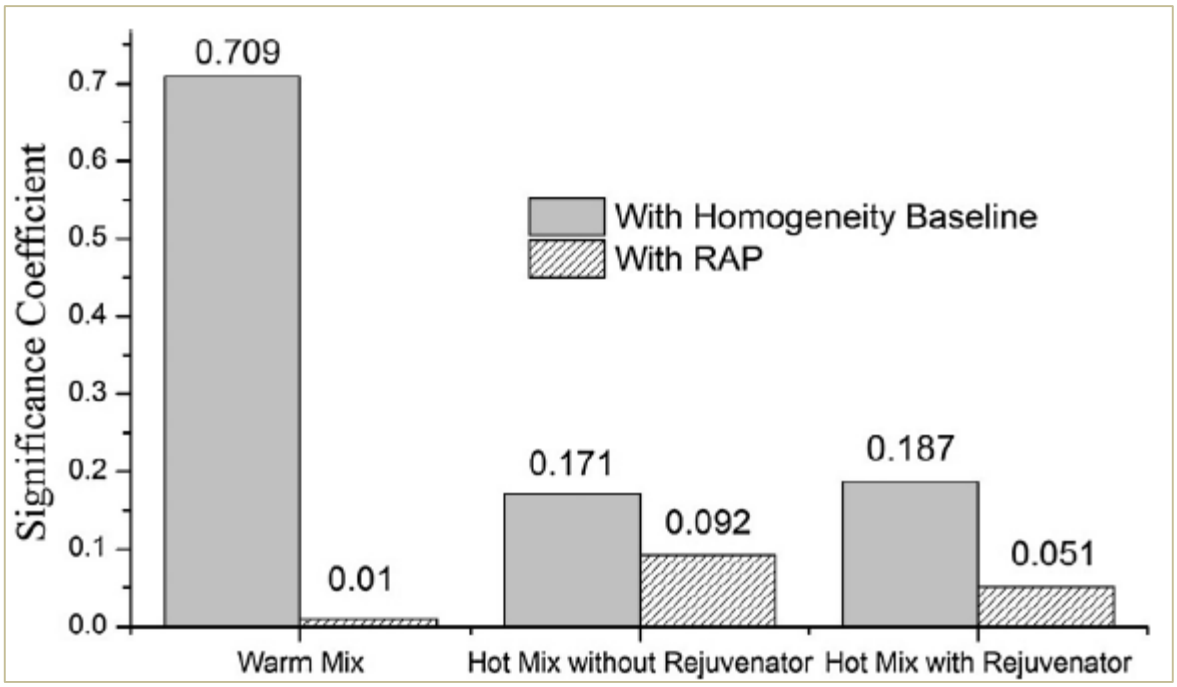


Figura 25 - Coeficiente de significancia

Fuente: (Ding et al., 2016)

En la Figura 25 se puede evidenciar que la mezcla WMA-FA presentó el valor más alto del coeficiente de significancia, esto indica claramente que la mezcla tibia presenta las condiciones más favorables para ser mezclada con RAP como se puede asegurar al observar que el envejecimiento del asfalto mezclado tiene gran uniformidad.

Noferini et al. (2017) se encargaron de evaluar la interacción existente entre el asfalto envejecido del RAP y el asfalto virgen para la elaboración de mezclas con RAP, para este fin evaluaron las mezclas presentadas en la Tabla 16:

Tabla 16 - Mezclas con RAP y material virgen

Material	Mezcla 0 (control)	Mezcla 1 (10%RAP)	Mezcla 2 (20%RAP)	Mezcla 3 (30%RAP)
Grava 10/20 mm	25%	26%	26%	23%
Grava 6/10 mm	16%	13%	14%	15%
Grava 4/6 mm	16%	16%	14%	15%
Arena 0/4 mm	40%	33%	24%	15%
Relleno	3%	2%	2%	2%
RAP 0/8 mm	0%	5%	8%	14%
RAP 8/12 mm	0%	5%	12%	16%
Asfalto recuperado del RAP 0/8 mm	0.0%	0.3%	0.4%	0.7%
Asfalto recuperado del RAP 8/12 mm	0.0%	0.3%	0.6%	0.8%
Asfalto virgen, penetración 50/70	5.0%	4.5%	4.0%	3.5%

Fuente: (Noferini et al., 2017)

El contenido de asfalto del diseño de las mezclas correspondió a 5% por peso de los agregados y está conformado por la suma del asfalto virgen y el asfalto del RAP, por otro lado la temperatura de los agregados se fijó en 180°C y el RAP fue secado durante dos horas a 110°C, también se encargaron de realizar una gradación muy detallada con el fin de minimizar el efecto de la misma en los resultados de las pruebas asegurando así que los resultados obtenidos dependerían principalmente del porcentaje de RAP utilizado, tal y como se puede observar en la Tabla 17.

Tabla 17 - Propiedades de los asfaltos analizados

Muestra de asfalto	Penetración a 25°C (dmm) EN 1426	Punto de ablandamiento (°C) EN 1427	Índice de penetración EN 12591
B_0	27	55	-1.3
B_1	25	56	-1.3
B_2	21	57	-1.3
B_3	16	63	-0.8
B_{RAP}	7	73	-0.5

Fuente: (Noferini et al., 2017)

Durante la caracterización de los asfaltos de las mezclas elaboradas, encontraron que la penetración del material se reducía en la medida en que se aumentaba la cantidad de RAP, así mismo pudieron observar como el punto de ablandamiento aumentaba de manera directamente proporcional a la cantidad de RAP en la mezcla. Para corroborar estos datos evaluaron la viscosidad dinámica de la mezcla de bitúmenes encontrando que al aumentar la cantidad de RAP (y por tanto la proporción de asfalto envejecido y rígido) aumentaba también la viscosidad dinámica de la mezcla, tal y como se presenta en la Figura 26:

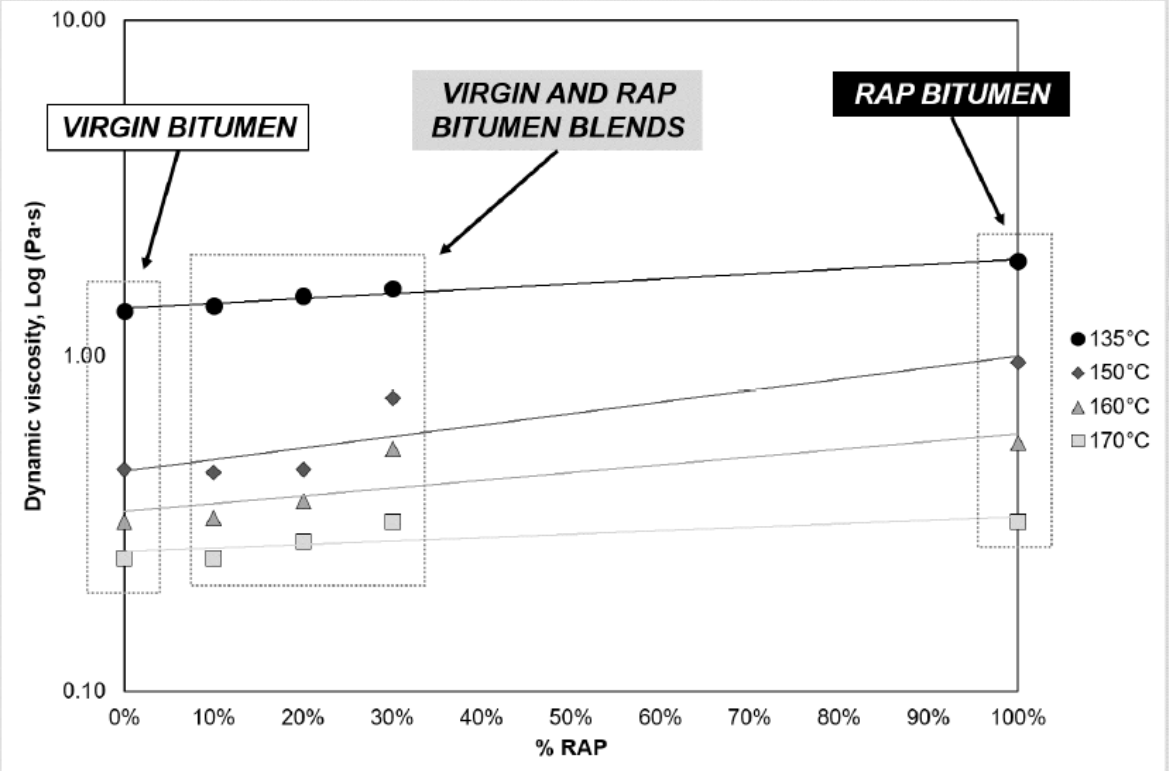


Figura 26 - Viscosidad de los bitúmenes

Fuente: (Noferini et al., 2017)

Considerando que existen dos periodos de envejecimiento del asfalto, a saber, a corto plazo (durante la elaboración de la mezcla) y a largo plazo (durante el periodo de servicio de la mezcla asfáltica) y que es en el corto plazo donde se da la mayor tasa de envejecido, resaltaron un aumento en la temperatura de producción y servicio de las mezclas asfálticas afectará negativamente la viscosidad del asfalto, como se puede observar en la Figura 27.

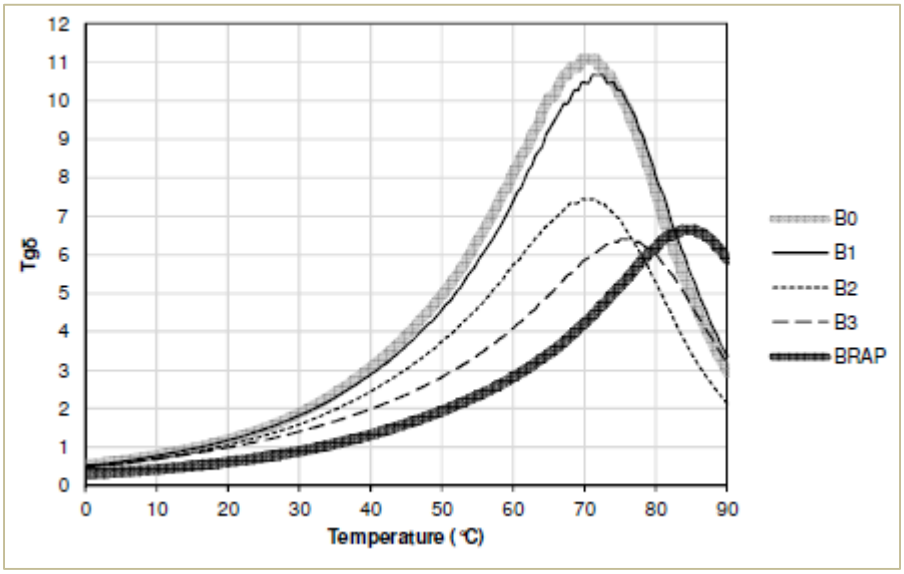


Figura 27 - Temperatura vs viscosidad del asfalto

Fuente: (Noferini et al., 2017)

Al analizar el ángulo de fase contra la temperatura de ensayo como se puede observar en la figura anterior, encontraron que en la medida en que se aumentó la temperatura de ensayo y el contenido de RAP se amplió el rango en donde el asfalto se comportó de manera predominantemente elástica.

Considerando estas observaciones señalaron como la mezcla del asfalto envejecido aumenta la viscosidad del asfalto en la mezcla y si bien, al aumentar la temperatura la viscosidad decrece, esto genera efectos indeseados tales como una excesiva rigidización y por lo tanto una tendencia a la fragilidad.

Farooq & Mir (2017) dividieron las mezclas tibias que elaboraron con RAP en 5 niveles en función de su porcentaje de RAP de la siguiente manera:

- Nivel 1 (0-10% RAP): El porcentaje de RAP es tan bajo que tiene un efecto nulo en la mezcla elaborada y en el procedimiento utilizado.
- Nivel 2 (10-20% RAP): el aumento en el porcentaje de RAP dificulta mantener la gradación y el porcentaje de asfalto en la mezcla, se recomienda el uso de apiladores telescópicos para elaborar la mezcla.
- Nivel 3 (20-30% RAP): este nivel requiera un proceso de trituración, gradación y separación del material RAP.

- Nivel 4 (30-40% RAP) y nivel 5 (40-50% RAP): las mezclas con altos porcentajes de rap requieren equipos que permitan inyectar fácilmente el agua a la mezcla y se debe tener en cuenta que la rigidez y la viscosidad aumentarán reduciendo de esta forma la trabajabilidad de la mezcla.

En su investigación Farooq & Mir (2017) resaltan que la tecnología de mezclas tibias que permite un mejor aprovechamiento del RAP es la del «espumado» y recalcan que el envejecimiento de las mezclas está relacionado con la temperatura a la que se elaboran, que la resistencia al ahuellamiento no se ve afectada por este procedimiento y que el asfalto envejecido del RAP compensa el comportamiento blando del asfalto tratado a baja temperatura por el procedimiento de mezcla tibia. Debido a que las mezclas tibias son más blandas que la mezclas calientes y al agregarles RAP se rigidizan, se debe buscar un balance en cuanto al contenido de RAP y la resistencia a la fatiga de la mezcla para que se asemeje a la de una mezcla caliente.

Durante el análisis Farooq & Mir (2017) encontraron que la mezclas tibias presentaron una reducción de hasta un 1.4% en los vacíos, que el módulo resiliente aumentó en función de la cantidad de RAP utilizado en la elaboración de la mezcla, sin que este parámetro se viera afectado por el aditivo asociado a la baja de temperaturas. La resistencia al ahuellamiento para contenidos por debajo del 30% de RAP fue inferior en las mezclas tibias al compararlas con las mezclas calientes pero aumentó (sin importar la tecnología de mezcla tibia que se utilizara) a partir de un contenido de RAP del 30%, condición semejante a la que encontraron Zhao et al., (2013) en relación al porcentaje de RAP pero analizando la resistencia a la fatiga.

Las tecnologías tibias mejoran la trabajabilidad del RAP al reducir su viscosidad, la mezcla tibia con RAP presenta una mayor estabilidad, evidenciando una gran rigidez y capacidad de distribuir los esfuerzos aplicados. Para las mezclas con un 40% de RAP, la compactibilidad no varió considerablemente al cambiar la viscosidad del asfalto. Independientemente de la tecnología de mezcla tibia utilizada, estas presentaron mayores resistencias a la humedad en comparación con la mezcla caliente de referencia y las resistencias aumentaron en la medida en que se aumentaba el porcentaje de RAP utilizado en la elaboración de las mezclas. Gracias

a los aditivos utilizados en la elaboración de las mezclas tibias, se obtuvieron valores de resistencia a la fractura similares a los de las mezclas calientes y al añadir RAP esta resistencia a la fractura aumentó considerablemente sin que los aditivos (químicos, orgánicos o a base de agua) hicieran diferencia en este aspecto. Sin embargo, se encontró que el porcentaje de RAP disminuyó la resistencia a la fatiga de la mezcla.

Farooq & Mir (2017) presentan un recuento del desempeño de mezclas tibias con RAP utilizadas en Estados Unidos:

- La Autopista Estatal de Maryland utilizó una sección con mezcla tibia y un 35% de RAP para la capa de rodadura obteniendo rigideces similares para la mezcla caliente y la mezcla tibia.
- Un proyecto de demostración en Orlando Florida utilizó un 20% de RAP y zeolita, lo cual permitió reducir la temperatura de producción y compactación en 19°C y arrojó densidades similares a las de las mezclas calientes.
- RAP fresado de la ruta estatal 11 en Deland Florida fue utilizado en una tasa de 45:55 con material virgen para mezclas WMA-RAP y HMA-RAP arrojando como resultado que las mezclas tibias fueron más blandas.
- El análisis en laboratorio de cuatro mezclas utilizadas en la ruta 44 de Missouri reportó que la menor oxidación producida durante la elaboración de las mezclas tibias permitió el uso de un porcentaje de RAP más alto en comparación con las mezclas calientes. También determinaron una reducción en costo de $0.35/Ton por cada 1% de RAP utilizado.

Se puede observar que las mezclas tibias que incluyen RAP mejoran las condiciones de trabajo de los encargados de la instalación de la carpeta asfáltica y reducen el consumo de combustibles para la elaboración de las mezclas, así mismo mejoran aspectos de las mezclas asfálticas como la viscosidad, la trabajabilidad de la mezcla, la deformación, la resistencia al ahuellamiento, la falla en bajas temperaturas y la resistencia a la fatiga.

En relación con el RAP y las mezclas tibias la investigación de Xu et al. (2017) arrojó resultados positivos, puesto que el asfalto envejecido del RAP contribuye al endurecimiento de la mezcla y fortalece el enlace agregado-asfalto aportando una

mayor resistencia a la humedad como se puede observar en los resultados presentados en la Tabla 18, destacando que la tecnología de espumado ofreció mejores resultados en comparación con las mezclas tibias con aditivos.

Tabla 18 - Efecto del RAP en la susceptibilidad a la humedad

Contenido de RAP	Tracción indirecta (susceptibilidad a la humedad) (%)		
	Zhao et al.		Fereidoon et al.
	Espumado	Evotherm	Sasobit
15%	80-85%	80-85%	80-85%
20%	90-95%	90-95%	-
30%	95-100%	-	75-80%
40%	90-95%	90-95%	-
50%	-	-	70-75%
60%	-	-	65-70%

Fuente: (Xu et al., 2017)

En cuanto al comportamiento reológico del asfalto espumado y sus propiedades micromecánicas Wen et al. (2018) utilizaron asfalto con penetración 80/100 y llenante mineral obtenido a partir de caliza con las propiedades señaladas en la Tabla 19 y la Tabla 20:

Tabla 19 – en Propiedades técnicas del asfalto utilizado

Propiedades técnicas	Especificación	Resultado de la prueba	Límites según especificación
Punto de ablandamiento (°C)	T0606-2011	47.5	>44
Ductibilidad (15°C,cm)	T0606-2011	>100	>=100
Penetración (25°C, 0.1 mm)	T0606-2011	89	80-100
Densidad (15°C, g/cm^3)	T0606-2011	1.003	-
Solución (Cloral, %)	T0606-2011	99.87	>=99.5

Fuente: (Wen et al., 2018)

Tabla 20 - Propiedades técnicas del llenante mineral

Propiedades técnicas	Especificación	Resultado de la prueba	Límites según especificación
Gravedad específica (g/cm^3)	T 0352-2000	2.746	>=2.5
Contenido de agua (%)	T 0352-2000	0.7	<=1
Coeficiente hidrofílico	T 0352-2000	0.85	<1
Índice plástico (%)	T 0352-2000	2.8	<4
Rango de partículas			
<0.6mm		100	100
<0.15mm		93.1	90-100
<0.075mm		82.4	75-100

Fuente: (Wen et al., 2018)

El asfalto espumado fue producido utilizando una máquina de espumado mediante el procedimiento de inyección de agua descrito en estudios anteriores. Debido a la baja influencia de las presiones de agua y aire se establecieron valores de 5 y 4 bares respectivamente y variaron tanto las temperaturas del asfalto (130, 140, 150, 160 y 170 °C) y el agua de espumado por peso de la mezcla (2, 2.5, 3, 3.5 y 3%) respectivamente.

Wen et al. (2018) al evaluar los parámetros de expansión y vida media se encontró que tal y como se muestra en la Figura 28 la relación de expansión aumenta en la medida que se aumentan tanto la cantidad de agua de espumado como la temperatura a la que se calienta el asfalto decreciendo a partir de los 160°C, en complemento a la evaluación de las características de espumado del asfalto en la Figura 29 se ve el comportamiento de la vida media del asfalto también en función de la cantidad de agua utilizada en el espumado y de la temperatura a la que se calienta el asfalto

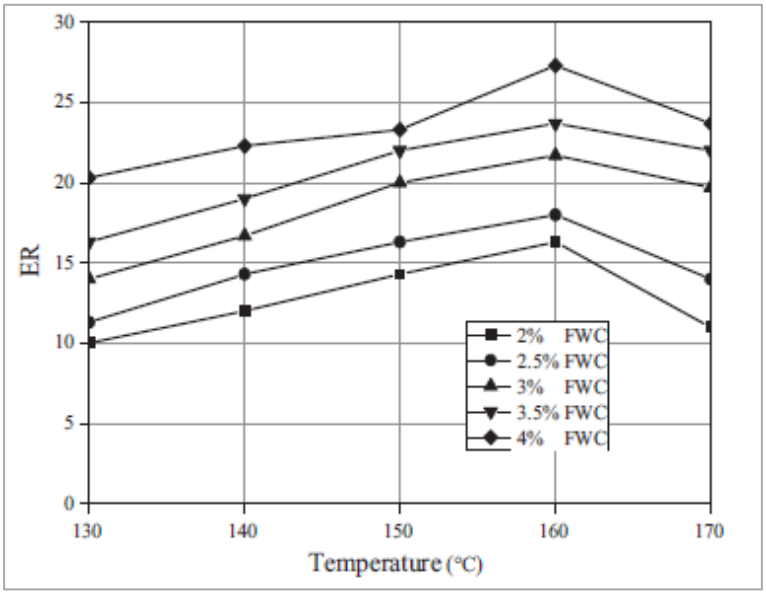
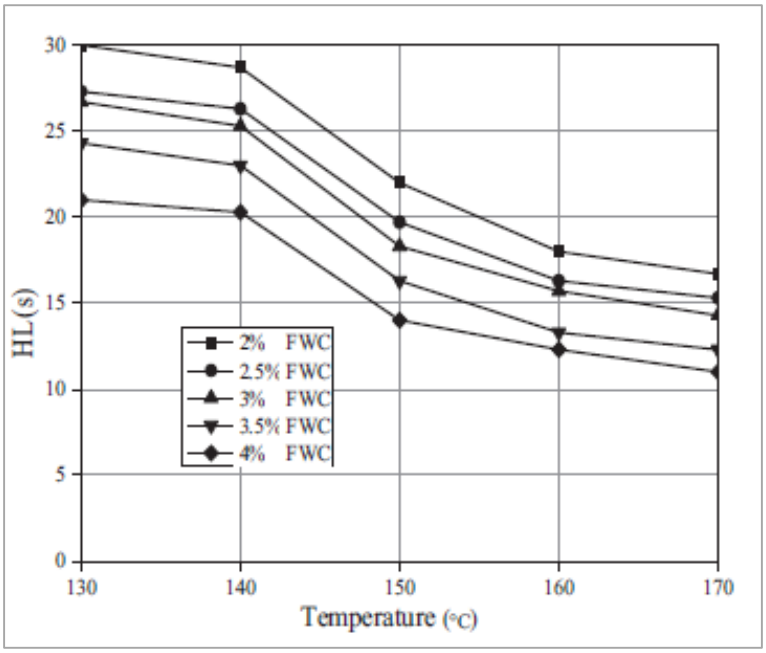


Figura 28 - Comportamiento de la relación de expansión en función de la temperatura y la cantidad de agua de espumado

Fuente: (Wen et al., 2018)



3

Figura 29 - Comportamiento de la vida media en función de la temperatura y el agua de espumado

Fuente: (Wen et al., 2018)

En la Figura 28 se aprecia que la relación de expansión aumentó conforme aumentaron tanto la temperatura de la mezcla como la cantidad de agua utilizada durante el espumado, sin embargo se observa como a partir de los 160°C la expansión decrece, por otro lado en la Figura 29 se presenta la variación de la vida media también en función de la temperatura de elaboración de la mezcla y la cantidad de agua utilizada durante el espumado haciéndose evidente que a mayor temperatura de la mezcla y a mayor cantidad de agua de espumado menor es la vida media de la espuma generada.

El índice de espumado indica las condiciones de un asfalto para ofrecer un buen desempeño durante el proceso de espumado relacionando los dos parámetros principales (relación de expansión y vida media), en la Figura 30 se relacionó este valor con la cantidad de agua utilizada para el espumado del asfalto encontrando que el porcentaje de agua inyectado al asfalto para que se genere la espuma es directamente proporcional al índice de espumado.

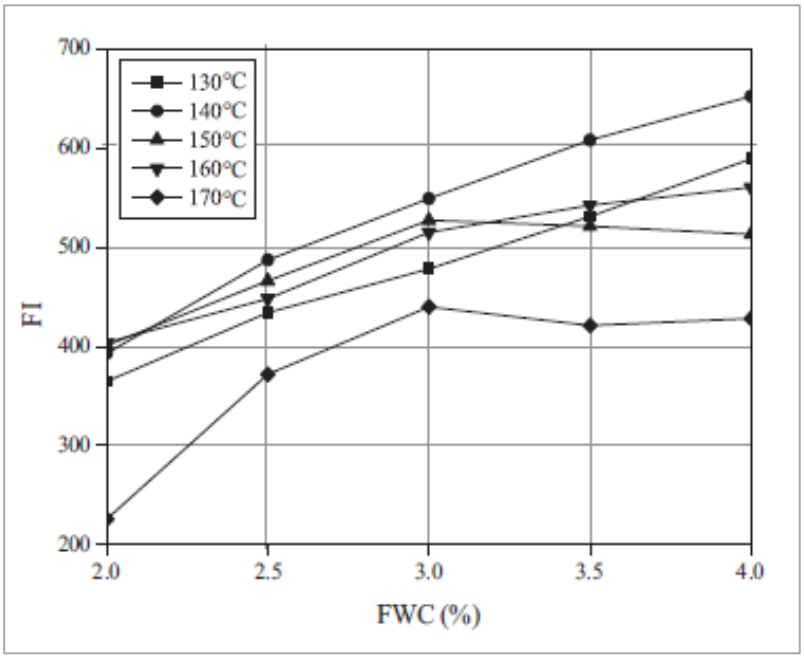


Figura 30 - Índice de espumado en función del agua de espumado

Fuente: (Wen et al., 2018)

Al ver que la cantidad de agua influye en los dos parámetros que determinan el buen o el mal comportamiento del asfalto durante el espumado decidieron realizar una gráfica en la que se pudieran evaluar simultáneamente tanto la relación de expansión como la vida media en relación con la cantidad de agua tal y como se muestra en la Figura 31, esta metodología les permitió establecer el contenido óptimo de agua en el espumado como un 3.5% con respecto al peso de la mezcla elaborada, puesto que con ese contenido de humedad se consigue un equilibrio entre los valores de vida media y radio de expansión.

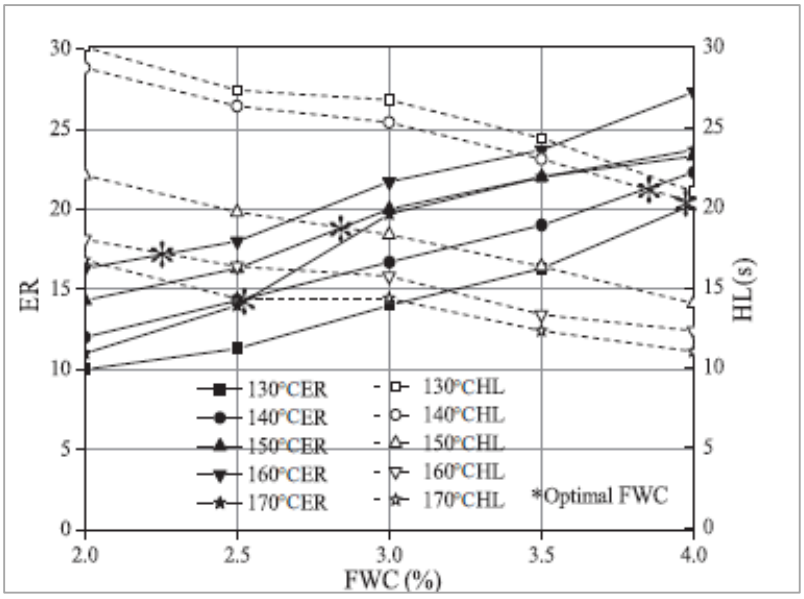


Figura 31 - Relación de radio de expansión-vida media vs cantidad de agua

Fuente: (Wen et al., 2018)

Una vez estuvieron elaboradas las muestras fueron sometidas a pruebas de desempeño a altas temperaturas basadas en cálculo del parámetro G/sinδ, para entender estos análisis se debe tener en cuenta que según el Superpave:

- G → es un valor que en la medida en que sea más alto indica que la mezcla asfáltica es más rígida, es decir que es más resistente a las deformaciones.
- δ → en la medida en que su valor sea menor señala una mejor elasticidad en el material, es decir que la mezcla asfáltica tiene mayor capacidad para recuperar las deformaciones.

Es decir que entre más grande sea el valor calculado para G/sinδ mejor será el comportamiento de la mezcla asfáltica a lo largo del tiempo o en otras palabras mejor será su comportamiento reológico, teniendo esto claro se puede observar que según la Figura 32 para temperaturas superiores a 75°C el comportamiento de todas las mezclas fue similar pero las mezclas espumadas (FA) resultaron ser más resistentes a las altas temperaturas en comparación con las mezclas no espumadas (BA) y que adicionalmente las mezclas con un mayor porcentaje de llenante mineral (FR) mejoraron su resistencia. Para complementar el análisis del comportamiento reológico una prueba de resistencia a bajas temperaturas fue realizada y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 33 en donde se relacionan la resistencia al fisuración (S), el porcentaje de llenante mineral (FR) y la temperatura de ensayo. Quedó claro una vez más el aporte que tiene el porcentaje de llenante mineral en la resistencia de las mezclas y como a pesar de tener resistencias similares durante las pruebas a -10 y -14°C durante los ensayos ejecutados a -18, -22 y -26°C las resistencias de las mezclas no espumadas fueron superiores a los de las mezclas espumadas con una tendencia a separarse a partir del 0.8% de llenante mineral y de manera más marcada en el ensayo realizado a -26°C.

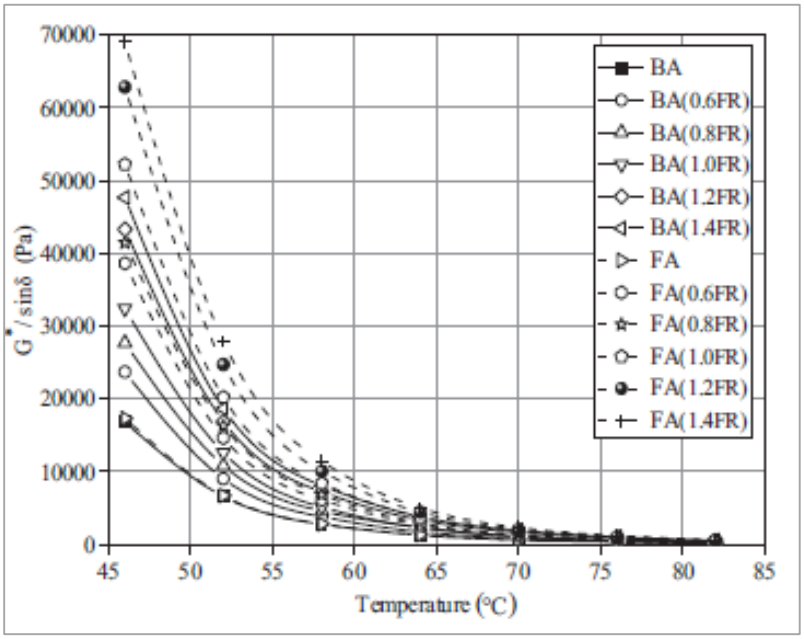


Figura 32 - Comportamiento reológico de las muestras – Altas temperaturas

Fuente: (Wen et al., 2018)

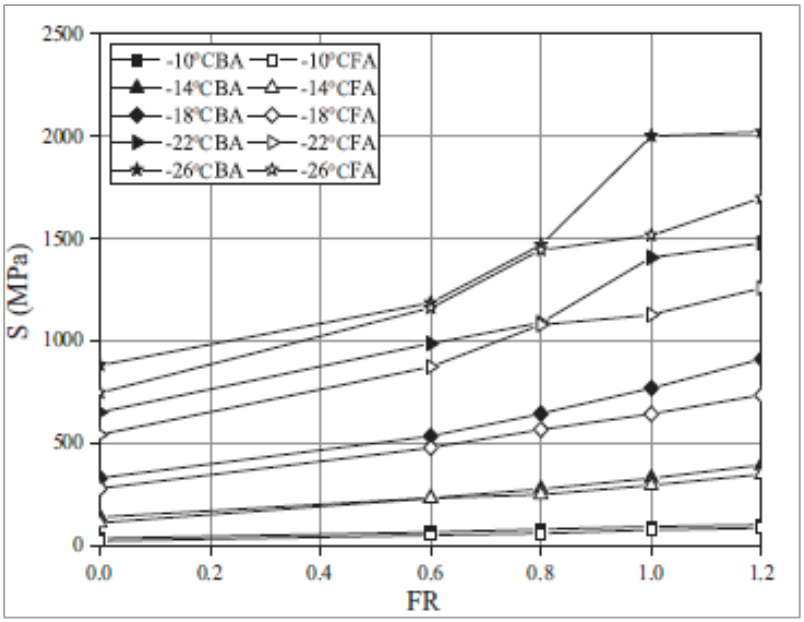


Figura 33 - Comportamiento reológico las muestras – Bajas temperaturas

Fuente: (Wen et al., 2018)

En la línea de investigación del efecto del RAP en mezclas tibias está el trabajo realizado por Kusam et al. (2017) enfocándose en la susceptibilidad a la humedad y la trabajabilidad de las mezclas. Con esta intención Kusam et al. (2017) elaboraron mezclas con asfaltos de PG 64-22 y 58-28, material RAP obtenido de una fuente local y un 1.5% de finos en la mezcla. La gradación se muestra en la Figura 34 y las tecnologías utilizadas en la elaboración de las mezclas tibias correspondieron a espumado y aditivo químico.

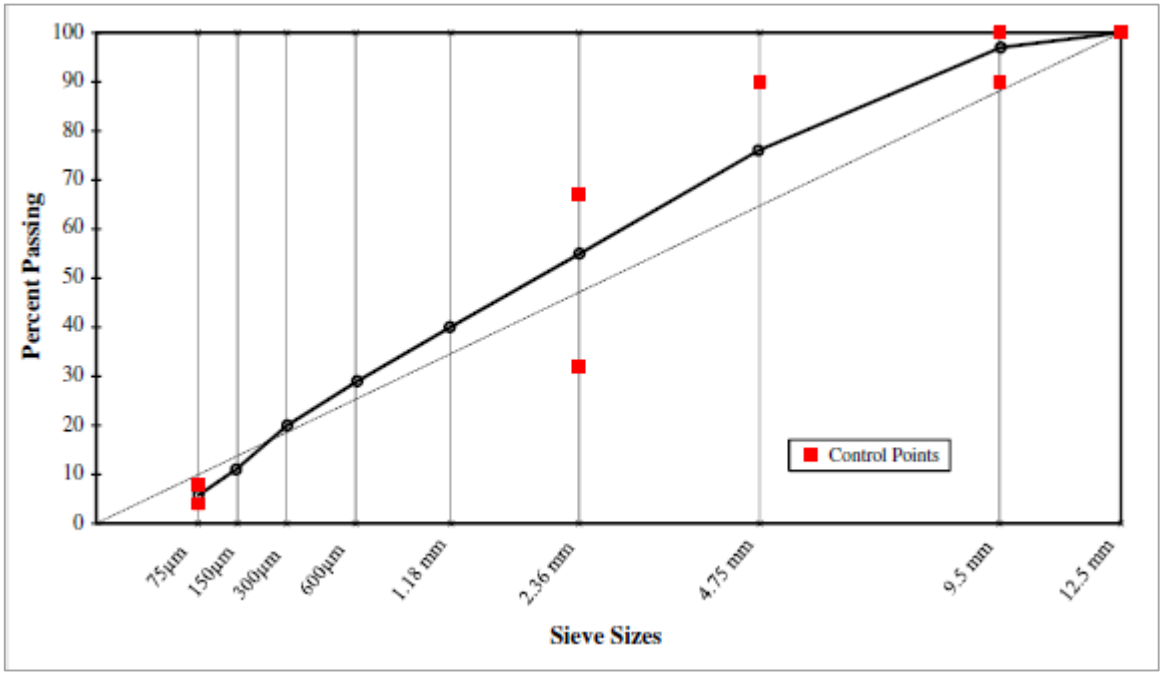


Figura 34 - Granulometría utilizada

Fuente: (Kusam et al., 2017)

Las temperaturas de mezclado y compactación de las mezclas calientes se establecieron como 163 y 140°C respectivamente, por otro lado para el material virgen utilizado en las mezclas tibias estos valores correspondieron a 135 y 120°C (con aditivo químico «Evotherm») y mezclas tibias mediante espumado (Foamer), las temperaturas de las mezclas tibias y calientes con RAP (0, 20 y 40%) fueron las mismas mencionadas anteriormente, para las mezclas que utilizaron un 40% de RAP se utilizaron los dos tipos de asfalto en la misma mezcla en el caso de la tecnología WAM Foam. Para la compactación se utilizó el SGC con 65 giros y la misma cantidad de contenido óptimo de asfalto calculada para las mezclas calientes

se utilizó en la elaboración de las mezclas tibias utilizando 6.0, 5.9 y 5.8% de asfalto para las mezclas con 0, 20 y 40% RAP respectivamente, las propiedades volumétricas de las mezclas se presenten en la Tabla 21:

Tabla 21 - Propiedades volumétricas de las mezclas elaboradas

Tipo de mezcla	Propiedades de la mezcla a $N_{de\ diseño}$	Tecnología de mezcla de asfalto			Requerimientos volumétricos
		HMA	Evotherm	Espumador	
mezclas con 6% de asfalto PG 64-22 y 0% de RAP	%Va	3.9	3.9	3.9	4.5+/-0.5
	G_{mm}	2.435	2.42	2.41	-
	%VMA	17	17.2	17.5	>15
	%VFA	77.1	77.3	77.7	65-78
	$\%G_{mm}$ at N_{ini}	89.5	89.3	89.5	<=89
	$\%G_{mm}$ at N_{des}	96.1	96.1	96.1	96
mezclas con 5.9% de asfalto PG 64-22 y 20% de RAP	%Va	4.2	4	4.1	4.5+/-0.5
	G_{mm}	2.422	2.414	2.415	-
	%VMA	17.5	17.6	17.7	>15
	%VFA	76	77.3	76.8	65-78
	$\%G_{mm}$ at N_{ini}	88.9	89.2	89.1	<=89
	$\%G_{mm}$ at N_{des}	95.7	95.9	96	96
mezclas con 5.8% de asfalto PG 64-22 y 40% de RAP	%VTM	4.4	4.4	3.9	4.5+/-0.5
	G_{mm}	2.425	2.437	2.43	-
	%VMA	17.5	17.3	17.2	>15
	%VFA	74.9	74.6	77.3	65-78
	$\%G_{mm}$ at N_{ini}	88.9	89.2	89.4	<=89
	$\%G_{mm}$ at N_{des}	95.6	95.6	96.1	96
mezclas con 5.8% de asfalto PG 58-28 y 40% de RAP	%VTM	3.8	4.3	4.1	4.5+/-0.5
	G_{mm}	2.415	2.436	2.424	-
	%VMA	17.6	17.3	17.5	>15
	%VFA	78.4	75.1	76.6	65-78
	$\%G_{mm}$ at N_{ini}	89.9	89.2	89.2	<=89
	$\%G_{mm}$ at N_{des}	96.2	95.7	95.9	96

Fuente: (Kusam et al., 2017)

Durante la elaboración de los especímenes para determinar la susceptibilidad a la humedad Kusam et al. (2017) emplearon el SGC para elaborar cilindros con un contenido de vacíos con aire objetivo de 7 +/- 0.5% y unas dimensiones de 150mm de diámetro y 95 +/- 5mm de altura con la misma gradación y el mismo contenido de asfalto mencionados anteriormente. Los cilindros fueron elaborados con las mismas temperaturas y fueron enfriados durante 2 horas para posteriormente

curarlos a 60°C por 16 horas, después del proceso de curado las mezclas fueron calentadas a la temperatura de compactación durante 2 horas y fueron compactados en el compactador giratorio. Los cilindros secos fueron probados a temperatura ambiente mientras los cilindros sometidos a humedad fueron inicialmente condicionados según los descrito en AASHTO T283 y posteriormente enfriado durante 2 horas en un baño de agua a 25°C y sometidos a prueba para determinar el valor de TSR que según la norma que regía este estudio (NCDOT) es de un 85%.

Tabla 22 - Valores de TSR obtenidos durante la investigación

Tipo de mezcla	Tracción indirecta (kPa)		Desviación estándar (kPa)		TSR (%)	Cumple/No cumple (min. 85%)
	Condicionado	No condicionado	Condicionado	No condicionado		
HMA 0% RAP	1074	1059	26.9	22.3	101.4	Cumple
HMA 20% RAP	1292	1473	43.2	25.7	87.8	Cumple
HMA 40% RAP (PG 58-28)	1315	1458	18.9	34.7	90.2	Cumple
WMA EVO 0% RAP	796	849	25.1	13.4	93.8	Cumple
WMA EVO 20% RAP	1345	1495	61.8	70	89.9	Cumple
WMA EVO 40% RAP	1360	1593	26	27.3	85.4	Cumple
WMA FOAM 0% RAP	1022	1082	24.7	16.4	94.4	Cumple
WMA FOAM 20% RAP	1202	1375	24.5	21.1	87.4	Cumple
WMA FOAM 40% RAP	1503	2006	27.4	43.4	74.9	No cumple

Fuente: (Kusam et al., 2017)

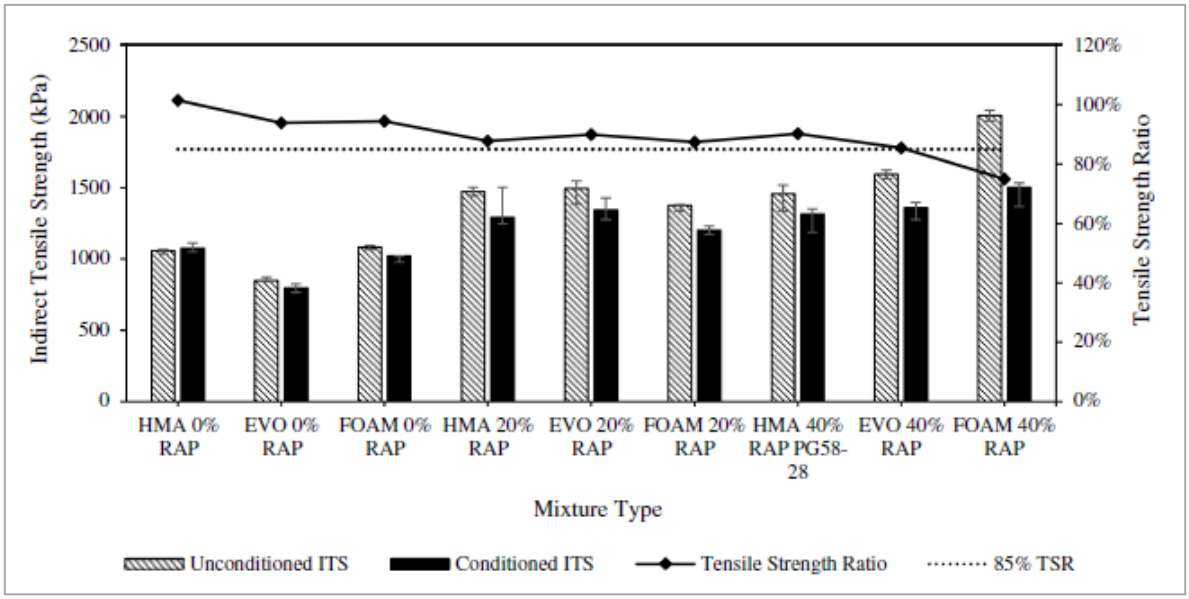


Figura 35 - Valores de TSR obtenidos durante la investigación

Fuente: (Kusam et al., 2017)

Como se puede observar en la Tabla 22 y en la Figura 35, los valores más altos de ITS fueron obtenidos a medida en que se aumenta la cantidad de RAP y las mezclas tibias con proceso de espumado se comportan de una mejor manera al añadir grandes cantidades de RAP en comparación con las mezclas tibias con aditivo o las mezclas calientes y a pesar de haber sido la única mezcla que no cumplió el requerimiento en su valor de TSR se debe considerar que la mezcla espumada con 40% de RAP fue la que obtuvo una mayor resistencia a la tracción indirecta en las dos condiciones (seca y húmeda).

Otro análisis enfocado en el comportamiento reológico de las mezclas tibias que incluyen RAP, fue llevado a cabo por Kim et al. (2018) para determinar la resistencia de las mezclas asfálticas mediante ensayos de flexión de vigas y ensayos de escala completa. Para los ensayos se utilizaron seis mezclas calientes convencionales y cuatro mezclas tibias que fueron elaboradas con aditivo químico o mediante espumado y con dos mezclas asfálticas con PG64-22 y 58-28 y con porcentajes de RAP de 20 y 40% por peso de la mezcla. Las líneas construidas tenían un espesor promedio de 100mm de carpeta asfáltica y 560mm de base granular. En la Tabla 23 se muestran las características de las mezclas utilizadas tales como su contenido de RAP, proceso de elaboración, asfalto virgen utilizado, etc. y mediante extracción con solvente determinaron que el contenido medio de asfalto del RAP utilizado correspondía a 4.7%.

Tabla 23 - Propiedades de las mezclas utilizadas para las líneas

ALF Lane	[1]VTM (%)	[2]VMA (%)	[3]VFA (%)	[4]AC (%)	[5]RBR (%)		Virgin Asphalt Binder, PG	Asphalt Mixture Production Process
					[6]RAP	[7]RAS		
*L1	4.3	16.1	73.4	5.08	[8]-	-	64-22	HMA
L2	4.3	16.1	73.6	5.07	40	-	58-28	foaming
L3	3.3	14.6	77.3	4.98	-	20	64-22	HMA
L4	4.4	15.6	72.0	4.95	20	-	64-22	Evotherm
L5	5.2	15.9	67.3	4.60	40	-	64-22	HMA
L6	3.6	14.9	75.7	4.91	20	-	64-22	HMA
L7	4.1	15.3	73.6	4.91	-	20	58-28	HMA
L8	4.9	16.4	70.3	4.95	40	-	58-28	HMA
L9	3.7	15.1	75.5	4.98	20	-	64-22	foaming
L11	4.9	16.5	70.5	4.89	40	-	58-28	Evotherm

Fuente: (Kim et al., 2018)

Se tomaron especímenes en función de lo indicado en las normas ASTM D7460-10 y AASHTO T321 con un volumen de vacíos igual a 7% +/- 1%, estos elementos fueron sometidos a un proceso de envejecimiento por medio de un horno de tiro forzado a una temperatura de 85°C durante 120 +/- 0.5 horas. Posteriormente se aplicaron cargas con repeticiones sinusoidales con una frecuencia de 10 Hz de manera continua hasta conseguir una reducción del 40% de la rigidez del material.

Los resultados del ensayo Wheel Track se muestran en la Figura 36 y la Tabla 24, se observó que la mezcla caliente con 0% de RAP obtuvo la menor longitud de fisuras con el mayor número de pasos de la rueda de carga y que cuando las mezclas calientes añadieron RAP, su desempeño se vio afectado de manera negativa generando una longitud de fisuramiento mucho mayor (más del triple) con una cantidad de cargas mucho menor (7 veces menos).Por otro lado para las mezclas tibias encontraron que al utilizar el aditivo químico el desempeño fue muy bajo y que al aumentar la cantidad de RAP utilizado en la mezcla la resistencia disminuyó aún más a pesar de verse que las mezclas tibias con el aditivo químico y RAP tuvieron un mejor desempeños que las mezclas calientes con RAP, por su parte las mezclas tibias elaboradas mediante espumado presentaron la mayor longitud de fisuras pero requiriendo para esto una mayor cantidad de cargas y a diferencia de las mezclas con aditivo químico el PG del asfalto influyó mucho en su comportamiento, las mezclas tibias utilizando la tecnología de espumado obtuvieron

después de la mezcla caliente con 0% RAP las mejores calificaciones en desempeño frente a la fisuración.

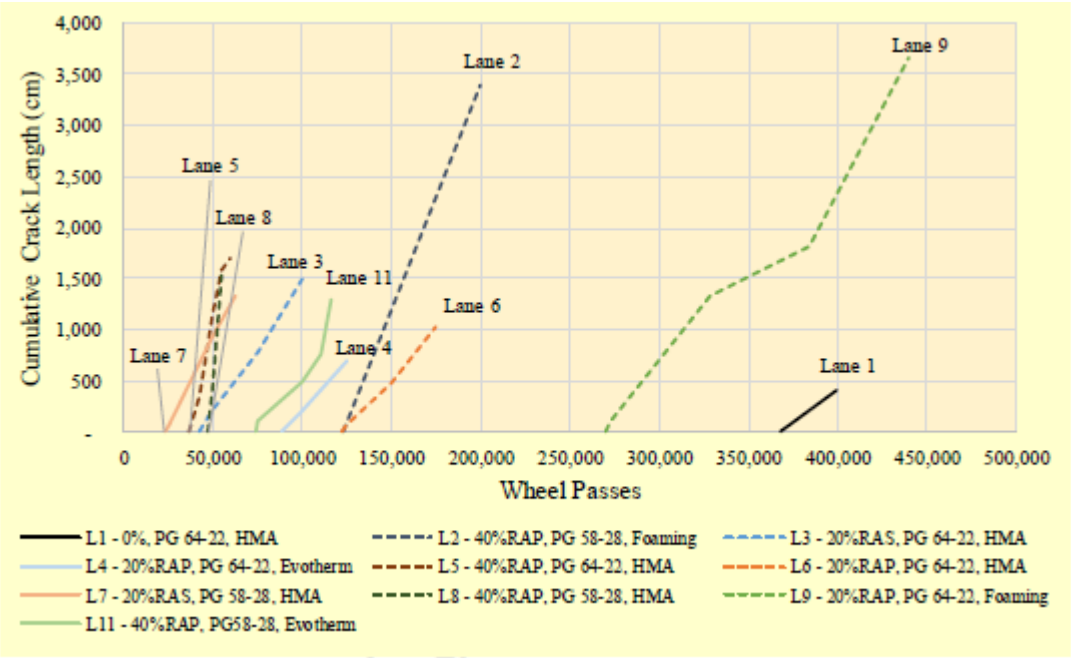


Figura 36 - Resultados prueba Wheel Track

Fuente: (Kim et al., 2018)

Tabla 24 - Resultados prueba Wheel Track

Línea No.	Resistencia a la Fatiga (N_f)	Esfuerzo de Tracción Estimado ($x10^{-6}$)	Clasificación de la Resistencia a la Fisuración
L1	368254	360	1
L2	123035	333	3
L3	42399	289	8
L4	88740	360	5
L5	36946	289	9
L6	122363	344	4
L7	23005	302	10
L8	47679	383	8
L9	270058	368	2
L11	74544	375	6

Fuente: (Kim et al., 2018)

Los resultados obtenidos durante las pruebas de flexión de vigas se muestran en la Figura 37 donde se indicó el módulo del espécimen elaborado con la mezcla de

cada línea (S) y el número de ciclos requeridos para llegar a la falla (BFN_f), se pudo observar que la mezcla con 20% de RAP y tecnología de espumado obtuvo el mayor número de ciclos requeridos para llegar a la falla superando incluso a la mezcla caliente tradicional y al aumentar la cantidad de RAP y reducir el PG del asfalto virgen utilizado, la mezcla asfáltica con espumado continuó teniendo uno de los mejores desempeños.

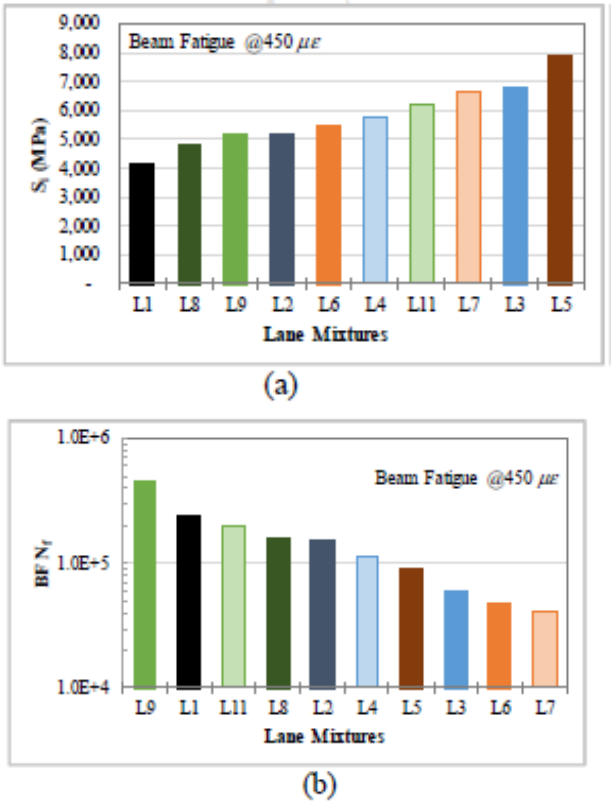


Figura 37 - Resultados de la prueba Flexural Beam Fatigue

Fuente: (Kim et al., 2018)

Dentro de las conclusiones del estudio de Kim et al. (2018), se destaca que el uso de tecnologías tibias y, en especial, de espumado favorece la resistencia a la fatiga de las mezclas que contienen RAP, sin embargo, al aumentar el contenido de RAP la mezcla asfáltica se vuelve más susceptible a la fisuración.

Otra investigación enfocada a la estimación de la resistencia de las mezclas tibias con RAP frente a la fisuración por fatiga fue realizado por parte de Wu et al. (2019) quienes compararon esta resistencia frente a mezclas calientes de control. El

estudio de Wu et al. (2019), se realizó en 23 pavimentos en servicio en distintos estados de Estados Unidos. Cada proyecto poseía por lo menos una mezcla tibia y una mezcla caliente de control. En la Figura 38 se presenta una clasificación de los proyectos que hicieron parte de la investigación en función de distintos parámetros tales como el clima, el tipo de mezcla tibia, tipo de pavimento, nivel de tráfico y uso de RAP.

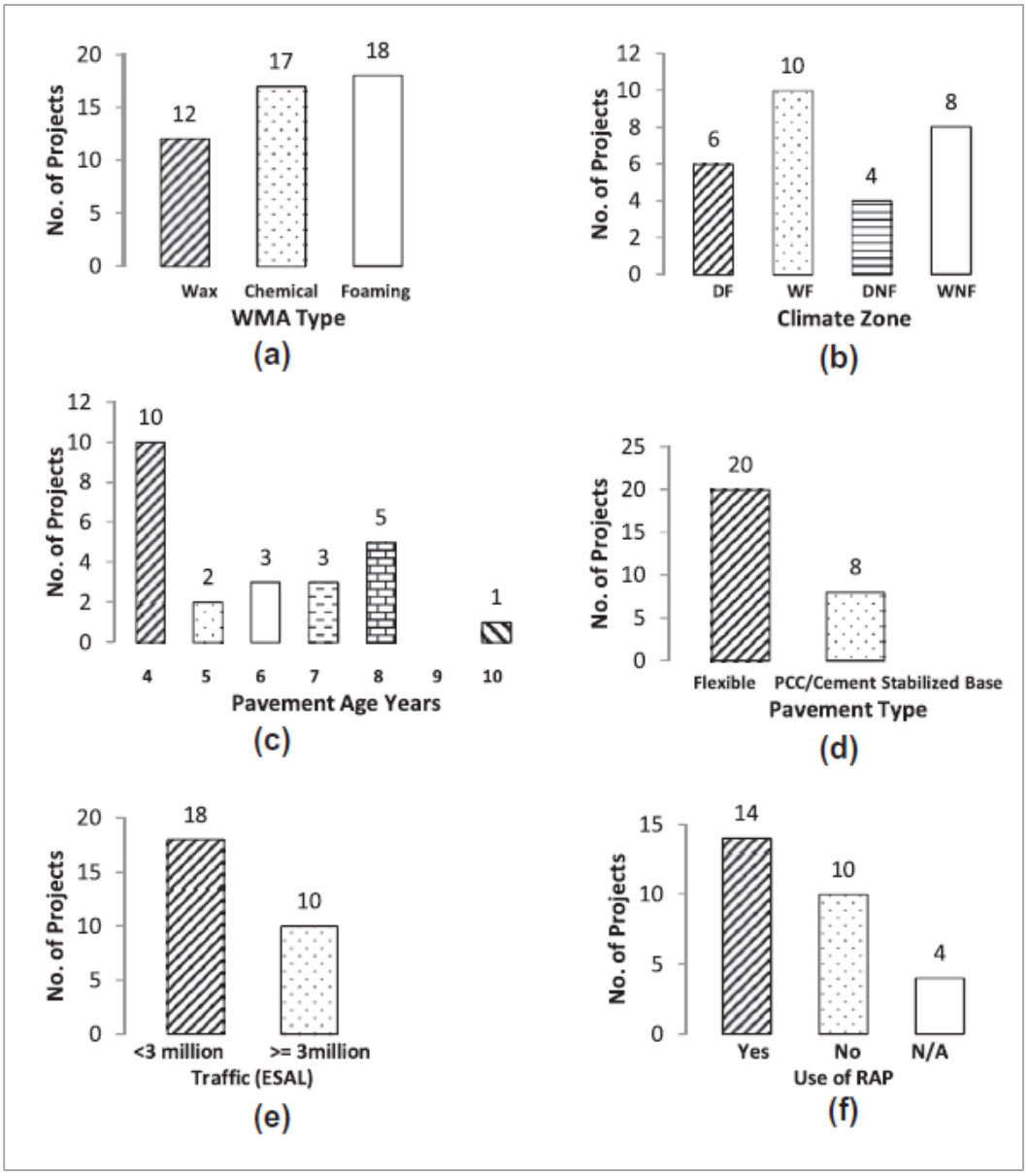


Figura 38 - Clasificación de los proyectos del estudio

Fuente: (Wu et al., 2019)

En campo extrajeron los núcleos de cada vía, de 100mm diámetro y 38mm de altura, en medio de las huellas. Las temperaturas a las que se realizaron las pruebas de módulo dinámico fueron -20, -10, 0, 10, 20 y 30°C con frecuencias de 20, 10, 5, 1 y 0.1Hz, el orden de las condiciones fue de menores a mayores temperaturas y de altas a bajas frecuencias. También utilizaron pruebas de tracción indirecta para determinar parámetros de rotura que pueden utilizarse para estimar la resistencia a la fatiga, tales como densidad de trabajo de fractura que se obtiene al dividir el trabajo de fractura sobre el volumen del espécimen y el trabajo de fractura es el área bajo la curva de carga vertical vs desplazamiento vertical como se muestra en la Figura 39.

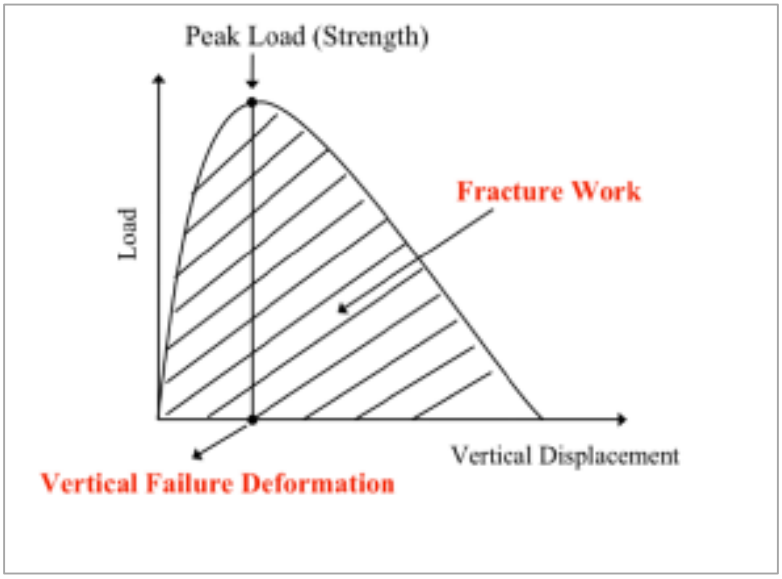


Figura 39 - Trabajo de fractura

Fuente: (Wu et al., 2019)

Los resultados de fisuración por fatiga se obtuvieron en dos diferentes rondas de prueba, a continuación se presentan los resultados de resistencia a la fisuración por fatiga obtenidos en cada una de las rondas de prueba, en la Figura 40 y la Figura 41 se discrimina la tecnología de espumado utilizada teniendo en cuenta que Sasobit es un aditivo orgánico, Water-based Foaming es el espumado mediante la inyección de agua a la mezcla y Water-containing Foaming se refiere al espumado mediante zeolitas. En la gráfica denominada HMA vs Foaming, se comparan las

mezclas calientes con las mezclas tibias con espumado (zeolitas e inyección de agua).

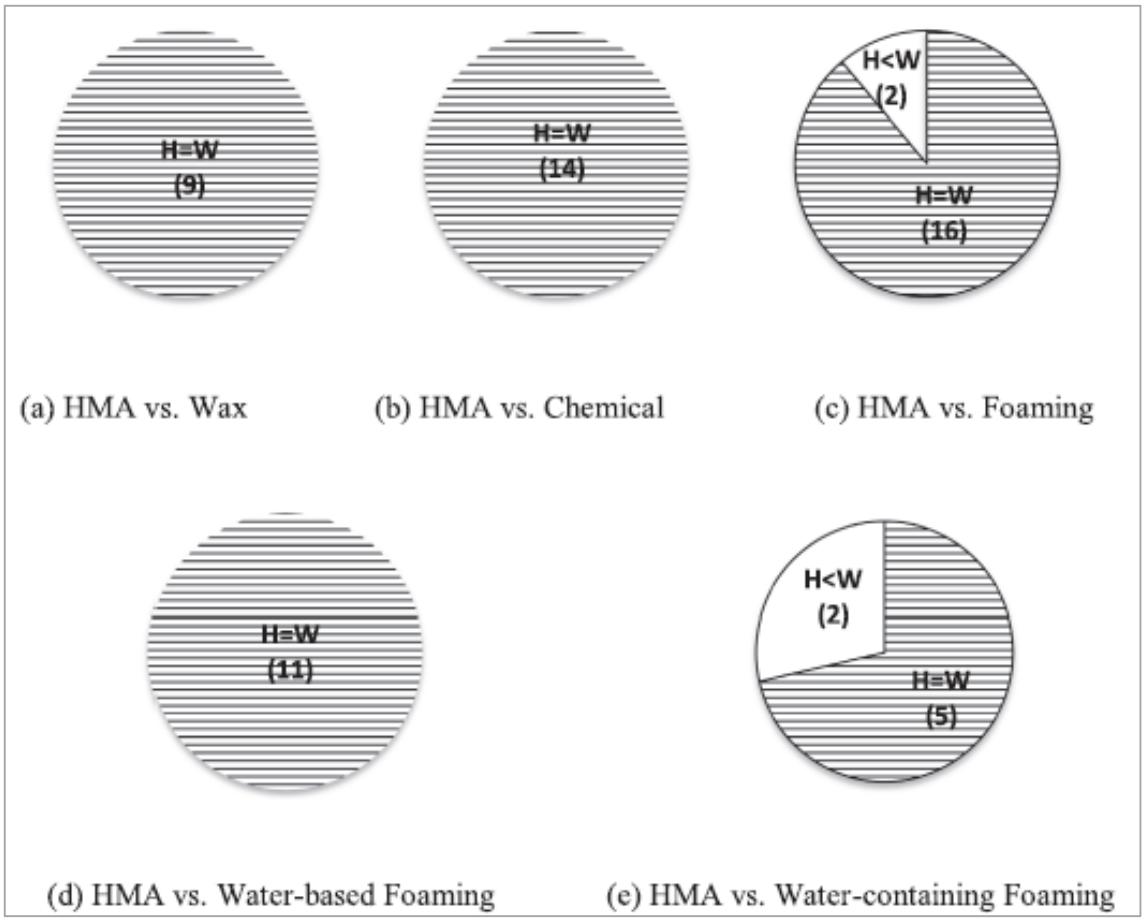


Figura 40 - Resultados de resistencia a la fisuración por fatiga

1ra ronda

Fuente: (Wu et al., 2019)

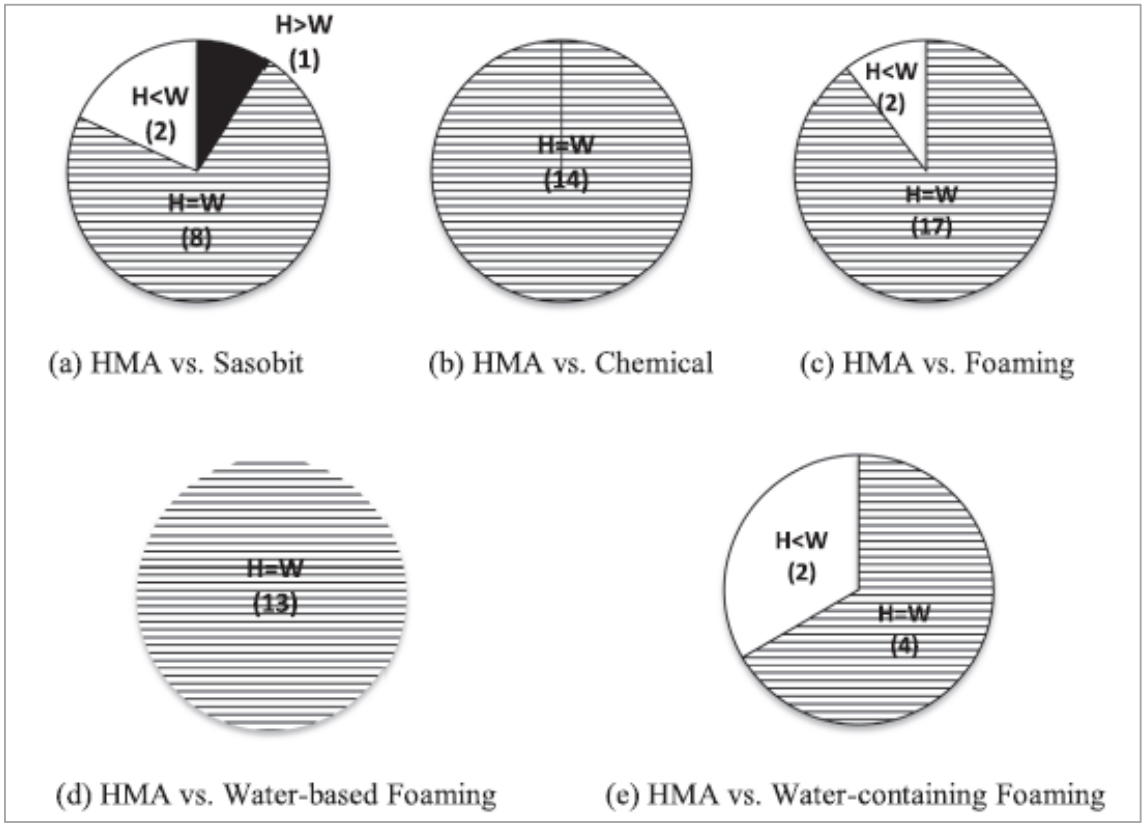


Figura 41 - Resultados de la resistencia a la fisuración por fatiga
2da ronda

Fuente: (Wu et al., 2019)

Los resultados obtenidos por Wu et al. (2019), reflejan que las mezclas más efectivas son aquellas mezclas tibias elaboradas con el uso de un aditivo químico y espumado mediante inyección de agua, puesto que presentaron un desempeño equivalente al de las mezclas calientes tradicionales. Las conclusiones de este estudio señalan que las mezclas tibias elaboradas con espumado presentaron una resistencia a la fatiga muy similar a la de las mezclas calientes tradicionales discrepando con lo observado por Kim et al. (2018) pero coincidiendo en la observación referente a un desempeño mejor de mezclas tibias en mayor medida con espumado y en una menor magnitud con aditivo químico.

En una investigación que contó con el apoyo del departamento de transporte de Tennessee Zhao et al. (2012) utilizaron mezclas tibias elaboradas únicamente

mediante espumado y posteriormente mediante un estudio similar Zhao et al. (2013) realizaron pruebas con el fin de comparar los diferentes comportamientos de mezclas asfálticas utilizando tecnologías tibias (Warm Mix Asphalt – WMA) y calientes (Hot Mix Asphalt – HMA), durante su investigación utilizaron tanto WMA con aditivos como WMA con la técnica de espumado, estableciendo las temperaturas de mezcla y compactación presentadas en la Tabla 25:

Tabla 25 - Temperaturas de trabajo - WMA

Mezcla		Temperatura de Mezclado (°C)	Temperatura de Compactación (°C)	Asfalto (%)
Base Espumada	WMA	120	115	4.2
	HMA	150	145	4.2
Rodadura Espumada	WMA	120	115	5.3
	HMA	150	145	5.3
Rodadura con	WMA	130	125	5.3
	HMA	155	150	5.3

Fuente: (Zhao et al., 2013)

Las muestras fueron sometidas a pruebas de tracción indirecta, módulo resiliente, ahuellamiento y fatiga, encontrando que las mezclas que utilizan tecnologías tibias se comportan de manera más efectiva en la medida en que se aumenta su porcentaje de RAP, aunque se puede observar una diferencia entre los resultados obtenidos en el 2012 y en el 2013, pues a pesar de la diferencia en el número de ciclos en el rango en que se pueden comparar las pruebas (0 a 9,000 ciclos) durante el 2012 la mezcla tibia con mayor porcentaje de RAP obtuvo el mejor desempeño como se puede ver en la Figura 42 en tanto que durante el 2013 fue la mezcla caliente con 30% de RAP la que más resistencia ofreció al ahuellamiento tal y como se presentan en la Figura 43.

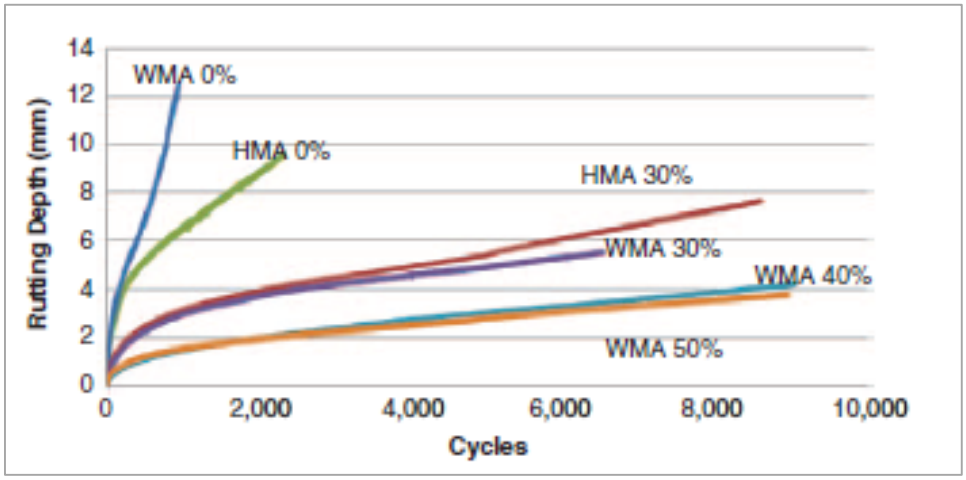


Figura 42 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP

Fuente: (Zhao et al., 2012)

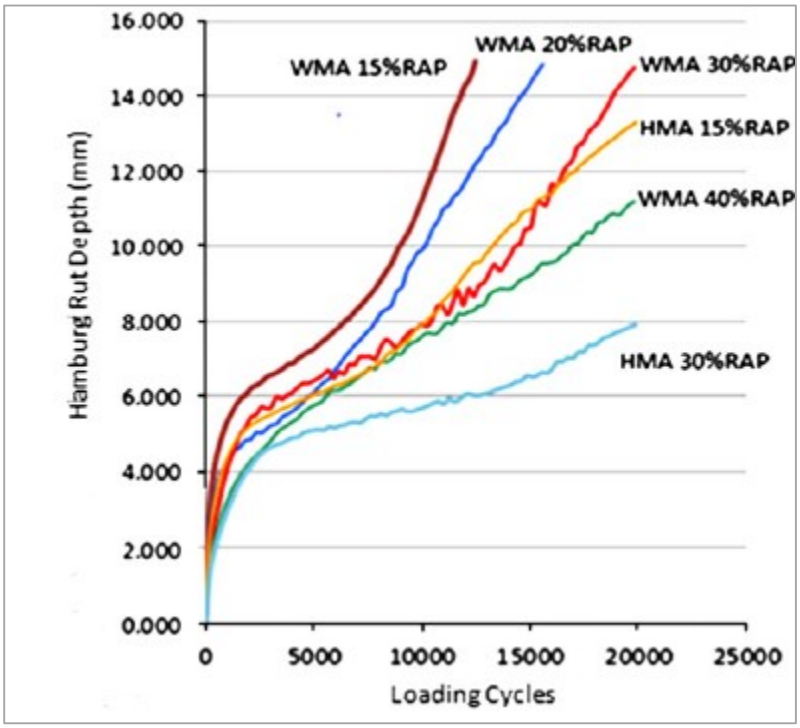


Figura 43 - Ahuellamiento vs Porcentaje de RAP (Espumado para rodadura)

Fuente: (Zhao et al., 2013)

Para el caso de la resistencia a la fatiga, según la Figura 44 se observó que las mezclas tibias tuvieron un desempeño igual e incluso mejor frente a las mezclas

calientes con la misma cantidad de RAP, siempre y cuando el porcentaje de material reciclado fuera superior al 30% según lo mostrado en la Figura 45. Se puede ver la resistencia a la fatiga presentó comportamientos similares durante las dos pruebas y cómo es superior en mezclas tibias con RAP en comparación con mezclas calientes o mezclas tibias elaboradas con material virgen.

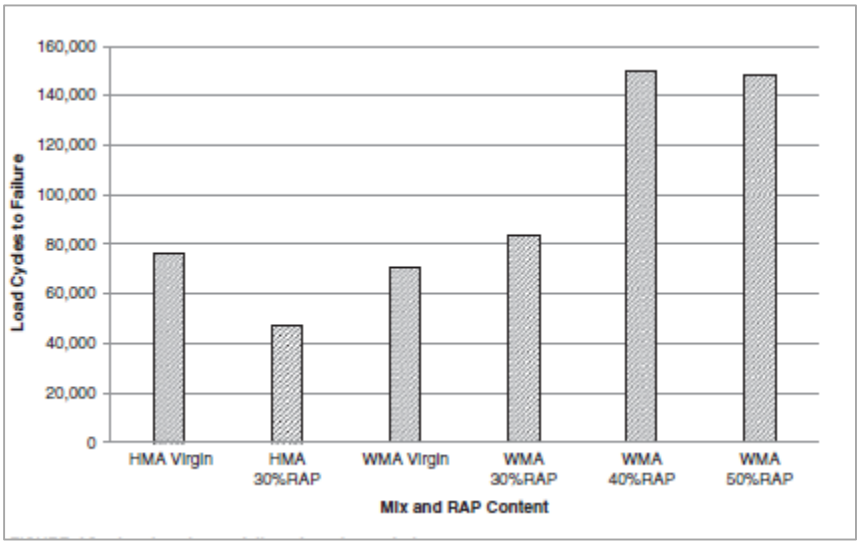


Figura 44 - Resistencia a la fatiga vs Porcentaje de RAP (2012)

Fuente: (Zhao et al., 2012)

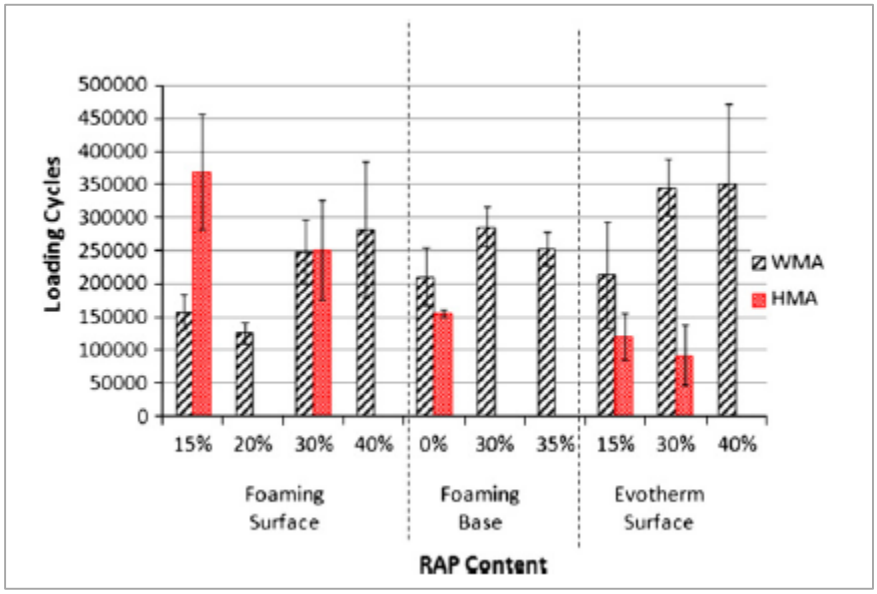


Figura 45 - Resistencia a la Fatiga vs Porcentaje de RAP (2013)

Fuente: (Zhao et al., 2013)

Así mismo, durante la comprobación de la susceptibilidad a la humedad, cuando las mezclas tibias incluyen porcentajes iguales o mayores al 30% de RAP su resistencia a la humedad se incrementa de manera proporcional (mostrando un ligero detrimento con 40%); razón por la cual concluyeron que porcentajes altos de RAP pueden influir efectiva y positivamente en la resistencia a la fatiga, a pesar de los comportamientos similares obtenidos durante las dos investigaciones los valores varían hasta el punto de indicar una pérdida de resistencia mayor al 20% por humedad durante el estudio de 2012 presentado en la Figura 46 en tanto que esta pérdida (20%) no se evidenció en el estudio del 2013 mostrado en la Figura 47.

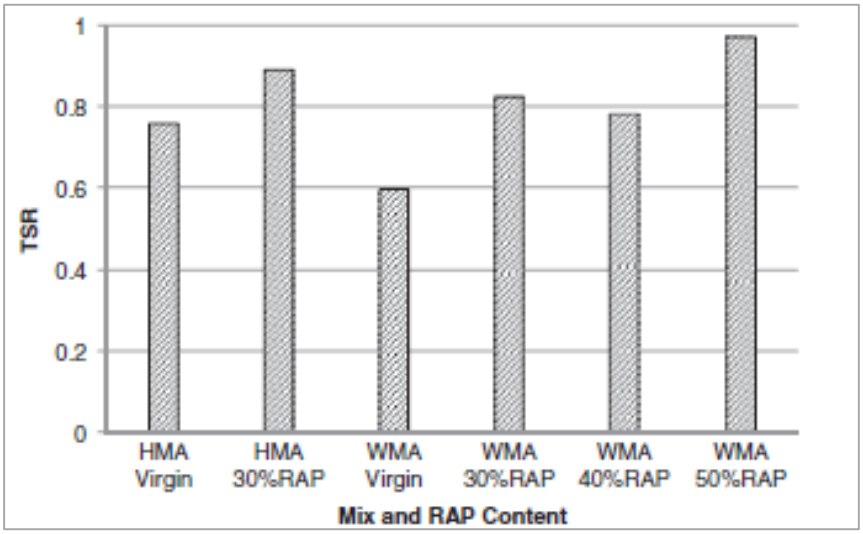


Figura 46 - Resistencia a la humedad vs Porcentaje de RAP (2012)

Fuente: (Zhao et al., 2012)

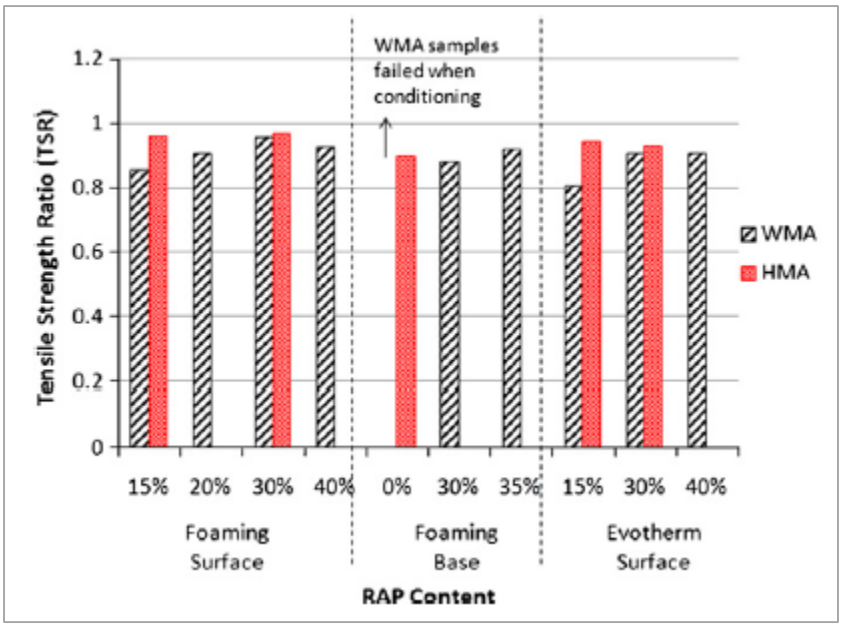


Figura 47 - Resistencia a la Humedad vs Porcentaje de RAP (2013)

Fuente: (Zhao et al., 2013)

Las diferencias observadas en las investigaciones realizadas (incluso por los mismos autores en trabajos que apenas distan un año el uno del otro) parecen

afirmar las conclusiones emitidas por Xiao et al. (2015), quienes después de analizar el efecto del RAP en mezclas tibias señalaron que es necesario investigar las propiedades individuales de cada fuente de RAP y que las agencias encargadas del control de los diseños de mezclas asfálticas generen ecuaciones que permitan predecir el efecto del RAP en el comportamiento reológico de las mezclas y cómo cada fuente de RAP debe ser investigada (en cuanto a sus efectos en mezclas que incorporen RAP) de manera individual.

Xie et al. (2017) resaltaron las ventajas de utilizar asfalto espumado y RAP en la elaboración de mezclas asfálticas tibias, por tal motivo elaboraron mezclas utilizando la tecnología de asfalto espumado con agua y porcentajes de asfalto reciclado de 20% y 30%. Entre las observaciones más importantes de este estudio se pueden mencionar las siguientes: el agua utilizada durante el espumado del asfalto tiene un efecto despreciable en la calidad del asfalto instalado en campo, el uso de WMA y RAP no influyen significativamente en la resistencia al ahuellamiento ni en la susceptibilidad a la humedad. Para llegar a estas conclusiones construyeron 4 secciones con mezclas densas de 50mm de espesor, dos de las secciones se elaboraron utilizando WMA y RAP y las otras dos HMA y RAP, en cada una de las tecnologías de asfalto (HMA y WMA) se utilizaron concentraciones de RAP de 20% y 30%. Utilizando ensayos de TSR observaron cómo las 4 mezclas presentaron una susceptibilidad menor al 10%, mediante análisis estadísticos demostraron que las 4 mezclas presentaron ahuellamiento similares. Adicionalmente encontraron ventajas del uso de WMA y RAP frente al uso de HMA y RAP como por ejemplo que las mezclas en caliente requirieron una menor cantidad de ciclos de carga para llegar a la falla cuando el porcentaje de RAP fue del 30% como se puede observar en la Figura 48 y en la Figura 49.

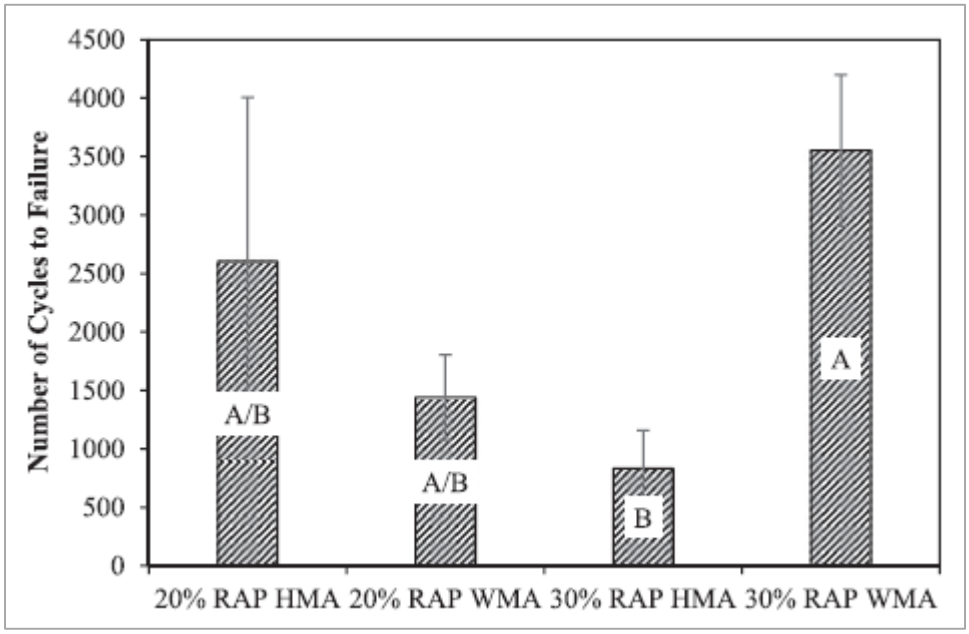


Figura 48 - Comparación HMA-WMA en la falla

Fuente: (Xie et al., 2017)

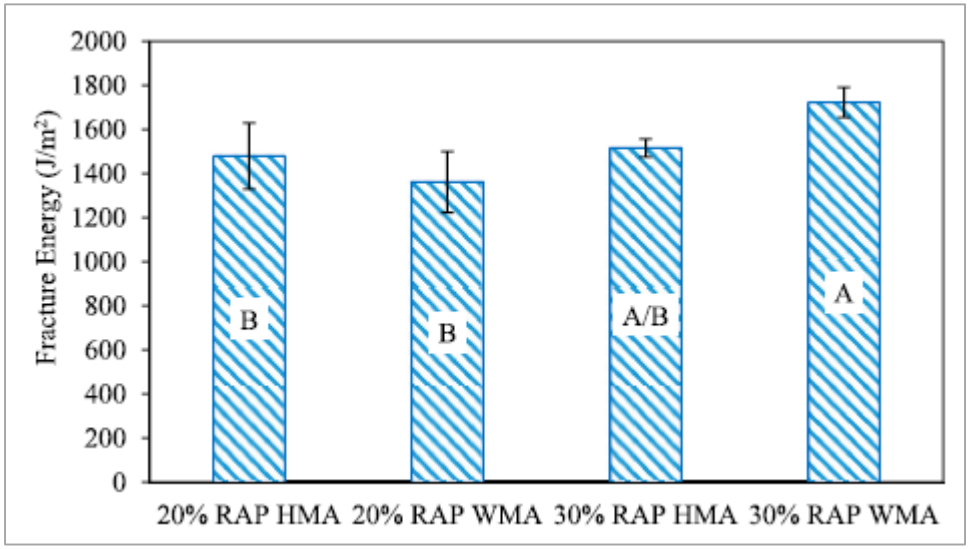


Figura 49 - Comparación HMA-WMA energía de fractura

Fuente: (Xie et al., 2017)

Durante las observaciones realizadas entre 13 y 25 meses en campo, Xie et al. (2017), evidenciaron que las mezclas que se elaboraron con un 20% de RAP y WMA presentaron mayores longitudes de fisuras en comparación con la mezcla HMA y RAP, en tanto que las mezclas elaboradas con un 30% de RAP presentaron

longitudes de fisuración similares y al cumplir 38 meses en servicio todas las mezclas se encontraban en un estado similar según lo presentado en la Figura 50. Así mismo, se produjeron una gran cantidad de fisuras transversales en las mezclas calientes siendo estas mayores en la mezcla caliente con 30% de RAP.

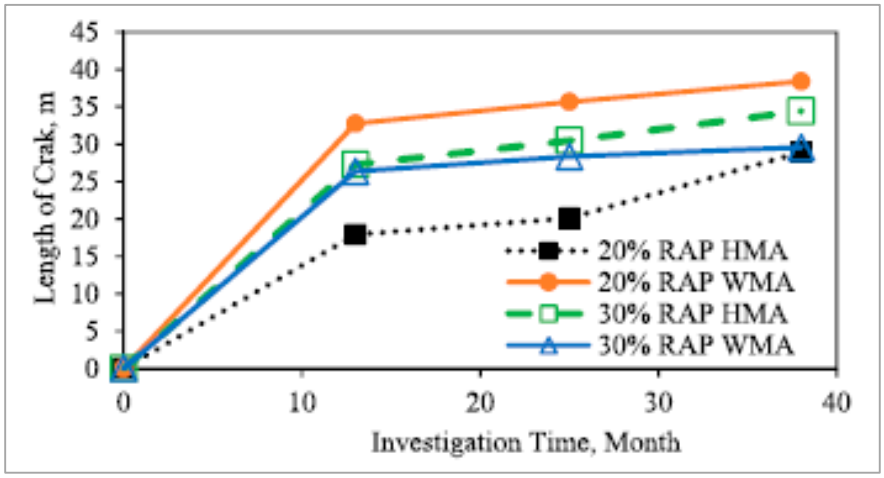


Figura 50 - Longitud de la fisuras por tipo de mezcla

Fuente: (Xie et al., 2017)

En su investigación L. P. F. Abreu et al. (2017) también investigaron el efecto del RAP en las mezclas asfálticas tibias, para evaluar la durabilidad de las mezclas se realizaron ensayos de tracción indirecta y susceptibilidad a la humedad mediante Tensile strenght ratio los cuales se presentan en la Figura 51 y la Figura 52.

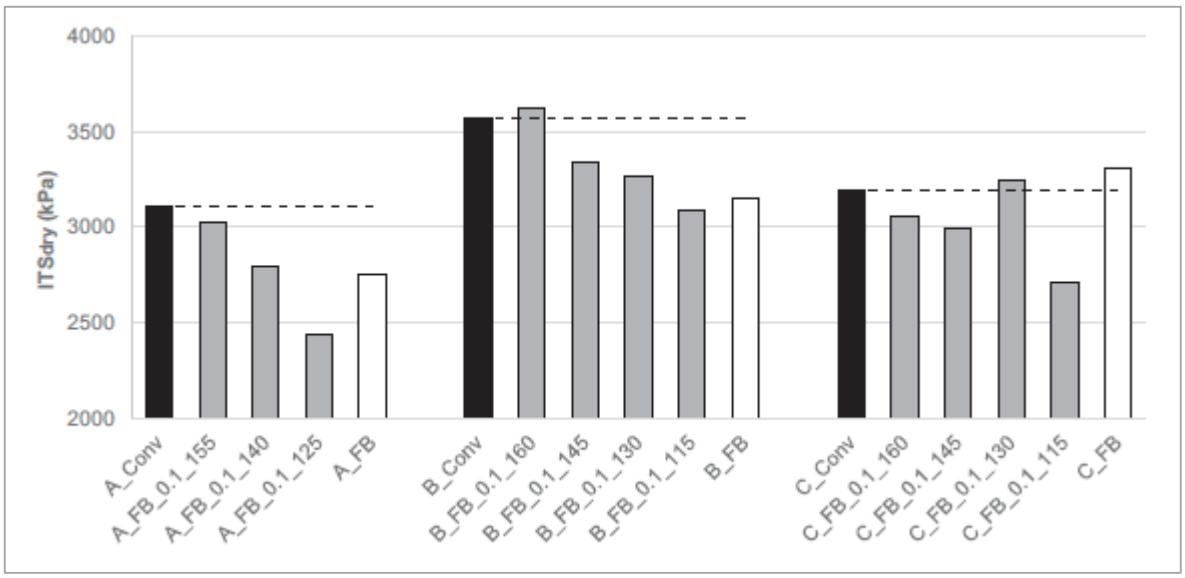


Figura 51 - Resultados de los ensayos de tracción indirecta

Fuente: (L. P. F. Abreu et al., 2017)

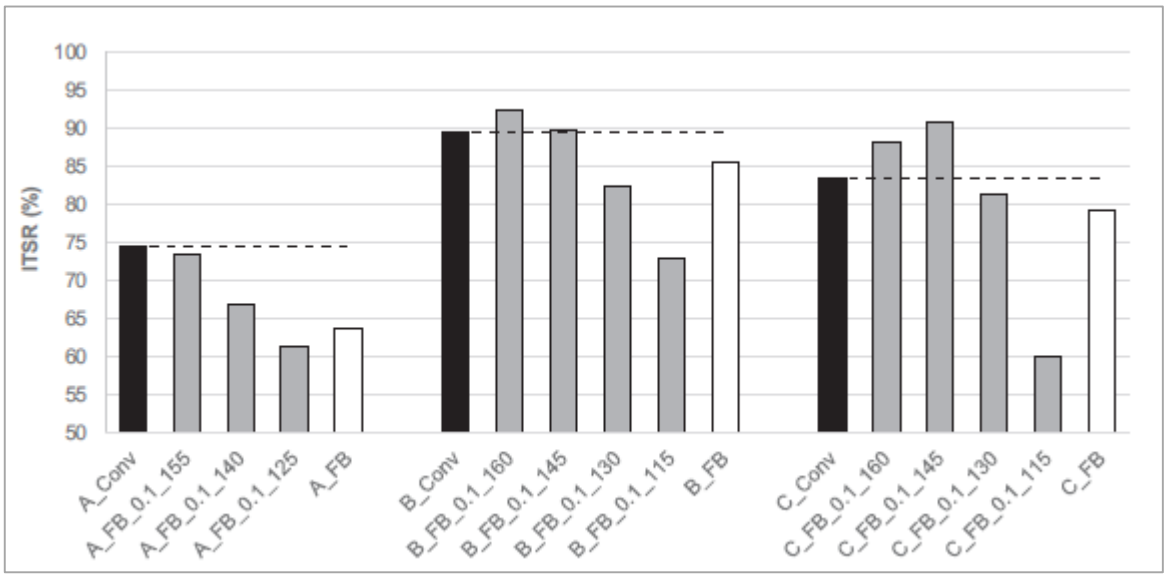


Figura 52 - Resultados de los ensayos de TSR

Fuente: (L. P. F. Abreu et al., 2017)

En términos generales, L. Abreu et al. (2017) encontraron que los asfaltos con penetraciones de 5.0 y 17.0 µm obtuvieron valores inferiores durante las pruebas de tracción indirecta y que los aditivos utilizados para mejorar el comportamiento de la mezcla tuvieron un efecto nulo en el asfalto de 5.0 µm en tanto que para los otros

dos algunos aditivos mejoraron el comportamiento de la mezcla. Por otra parte, en cuanto a los ensayos de TSR encontraron que una vez más el asfalto de 5.0 μm presentó valores muy bajos en este ensayo y ningún aditivo pudo mejorar su eficiencia, mientras que el asfalto de 17.0 μm en esta prueba obtuvo un mejor desempeño que el obtenido en el ensayo de ITS y algunos aditivos incrementaron considerablemente su resistencia. Finalmente el asfalto de 7.5 μm fue el que mejor desempeño tuvo tanto en ITS como en TSR y se pudo beneficiar de uno de los aditivos utilizados durante la investigación. En sus conclusiones L. Abreu et al. (2017), resaltaron que la mejor manera de aprovechar el material RAP es mediante el uso de mezclas tibias puesto que se requiere un material que sea muy blando para que compense la rigidez excesiva que aporta el asfalto envejecido del material reciclado y que el uso de asfaltos con penetraciones de 5.0 μmm debe ser cuidadosamente estudiado si se pretende utilizarlo para mezclas tibias con RAP puesto que su desempeño fue muy inferior y requiere tratamientos adicionales.

Durante su trabajo Dinis-Almeida & Afonso (2015), utilizaron asfalto que clasificaron mediante pruebas de penetración y punto de ablandamiento como se muestran en la Tabla 26. Indicaron las temperaturas de producción y compactación de las diferentes mezclas y señalaron las reducciones en temperatura y emisiones de gases contaminantes que implica el utilizar mezclas tibias.

Tabla 26 - Clasificación del asfalto utilizado por Dinis-Almeida y Afonso

Temperaturas	Mezclas Calientes	Mezclas Tibias	Reducción
	155°C-165°C	110°C-120°C	45°C
Temperatura de los Gases	65.6	50.3	15°C
CO_2 (%)	212	1.59	25%
CO (ppm)	217	151.6	30%
NO_x (mg/m^2 eg. NO_2)	26.8	21.5	25%
Polvo en el Medio Ambiente (mg/m^2)	168	21	88%

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

Complementando la información de la Tabla 26 en la Tabla 27 presentaron las temperaturas de los asfaltos, los agregados, las mezclas y la compactación así como las penetraciones y puntos de ablandamiento de los asfaltos utilizados.

Tabla 27 - Temperaturas de elaboración de las mezclas asfálticas

Propiedades	Asfalto 35/50	Asfalto BT 35/50
Penetración 25°C, 100g, 5 segundos (0.1 mm)	45	47
Punto de ablandamiento (°C)	54.5	54.7
Temperatura del asfalto	160 °C-165°C	155°C-160°C
Temperatura de los agregados	160 °C-165°C	>125°C
Temperatura de la mezcla	160 °C-165°C	>125°C
Temperatura de compactación	150 °C-160°C	>115°C

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

En relación con el RAP utilizado, Dinis-Almeida & Afonso (2015) determinaron el contenido de asfalto de un 5%, con penetración de 1.1mm y un punto de ablandamiento de 82.6°C, es decir que este asfalto era muy rígido y tenía un punto de ablandamiento alto. La gradación utilizada para la elaboración de las mezclas (mezcla caliente, mezcla tibia y mezcla tibia con 30% de RAP) fue la presentada en la Tabla 28.

Tabla 28 - Gradación de las mezclas

Agregados	HMA & WMA	Mezcla Tibia (RAP30%)
Cal Viva	3	3
Polvo de piedra	45	25
Grava 3/6	17	17
Grava 5/15	35	25
RAP	-	30

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

Con el fin de determinar el porcentaje óptimo de asfalto en la mezcla se utilizó la siguiente ecuación:

$P_b = 0.035 \times a + 0.045 \times b + K \times P_{200} + F$ **[3]**

Donde:

- P_b → porcentaje de asfalto por masa de mezcla
- a → porcentaje de agregados retenidos en el tamiz de 2.36mm
- b → porcentaje de agregados retenidos en el tamiz de 75µm

- K → es el 0.15 cuando un 11-15% que pasa el tamiz 75µm, el 0.18 cuando un 6-10% pasa el tamiz 75µm, 0.20 cuando 5% o menos pasa el tamiz 75µm
- P_{200} → porcentaje de agregado mineral que pasa el tamiz de 75µm
- F → es de 0-2% de absorción de agregados, en ausencia de datos se usa un valor del 0.7%

Para la mezcla tibia con 30% de RAP se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Pb_N = Pb_R - \frac{Pb_F \times TR}{100} \quad \textbf{[4]}$$

Siendo Pb_N el nuevo porcentaje de asfalto que se agregará.

$$\log pen_R = TBR \times \log pen_F + (1 - TRb) \times \log pen_n \quad \textbf{[5]}$$

$$TR_b = \frac{TR \times Pb_F}{Pb_R} \quad \textbf{[6]}$$

Donde:

- Pb_R → contenido de asfalto en porcentaje de la mezcla con asfalto reciclado
- Pb_F → contenido de asfalto del RAP
- TR → tasa de reciclado
- pen_R → penetración final de la mezcla con material reciclado
- TRb → tasa de reciclado de asfalto
- pen_F → penetración del asfalto del RAP
- pen_N → penetración del nuevo asfalto

En su investigación Dinis-Almeida & Afonso (2015), eligieron como objetivo una penetración de 3.0 mm obteniendo como resultado los valores consignados en la Tabla 29.

Tabla 29 - Resultados de los cálculos para el diseño de la mezcla con RAP

Diferencias en Valores	Resultados
pen_R=30x10^{-1}mm: pen_F=11x10^{-1}mm pen_N(BT 35/50)=47x10^{-1}mm	TRb=31%
TR= 30% Pb_F=5.0%; TRb=31%	Pb_R=4.9%
Pb_R=4.9%; Pb_{MBF}=Pb_F=5.0%; TR=30%	Pb_N=3.4%

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

Posteriormente elaboraron un total de 27 especímenes cilíndricos de aproximadamente 100 mm de diámetro y longitud variable, 3 por cada tipo de mezcla y fueron probados después de 36 horas de curado en un cuarto a temperatura ambiente y después de 50 minutos en inmersión en agua a 60°C. En cuanto a la preparación para las pruebas de sensibilidad a la humedad las muestras sometidas a humedad fueron sometidas a una presión absoluta de 6.7kPa en agua a 20°C por 30 minutos, luego fueron sumergidos en un baño de agua a 15°C por dos horas. Los cilindros secos fueron mantenidos a 20°C y luego fueron puestos en un ambiente a 15°C por 2 horas. En la Tabla 30 se muestran las características de las mezclas elaboradas.

Tabla 30 - Propiedades de las mezclas elaboradas Dinis-Almeida & Lopes Afonso

Mezclas Asfálticas	% Asfalto	Densidad (kg/m^3)	Volumen de Vacíos (%)	Vacíos en el Agregado Mineral (%)	Vacíos Rellenados con Asfalto (%)	Estabilidad Marshall (kN)	Flujo Marshall (mm)
HMA	4.9	2340	4.4	15.4	71.9	17.3	2.3
	5.4	2330	4.5	16.6	73	13.5	2.4
	5.9	2390	1.4	14.9	91	15.6	2.8
WMA	4.9	2350	4	15.1	73.5	15.3	2.3
	5.4	2350	3.3	15.5	78.8	13.6	2.7
	5.9	2310	2.7	16.1	83.1	12.1	2.9
WMARA30	3.9	2310	4.2	12.8	67.9	16.1	2.5
	4.4	2280	5.1	14.8	65.2	12.9	2.4
	4.9	2270	5.1	15.8	67.8	11.6	2.2
Administración Vial Poruguesa		-	3-5	Mínimo 14	-	7.5-15	2-4
Administración Vial Española		-	4-6	-	-	>12.5	2-3.5

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

Como se mencionó anteriormente 3 cilindros fueron elaborados por cada tipo de mezcla y los resultados obtenidos fueron promediados, en relación al módulo de rigidez se obtuvieron los valores presentado en la Tabla 31, se puede observar como la mezcla tibia sin RAP presentó el menor módulo y como el RAP mejora en esta aspecto a la mezcla de manera considerable.

Tabla 31 - Resultados de rigidez

Mezcla Asfáltica	% Asfalto	Módulo de Rigidez (Mpa)
HMA	5.4	5021
WMA	4.9	3611
WMARA30	4.4	4750

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

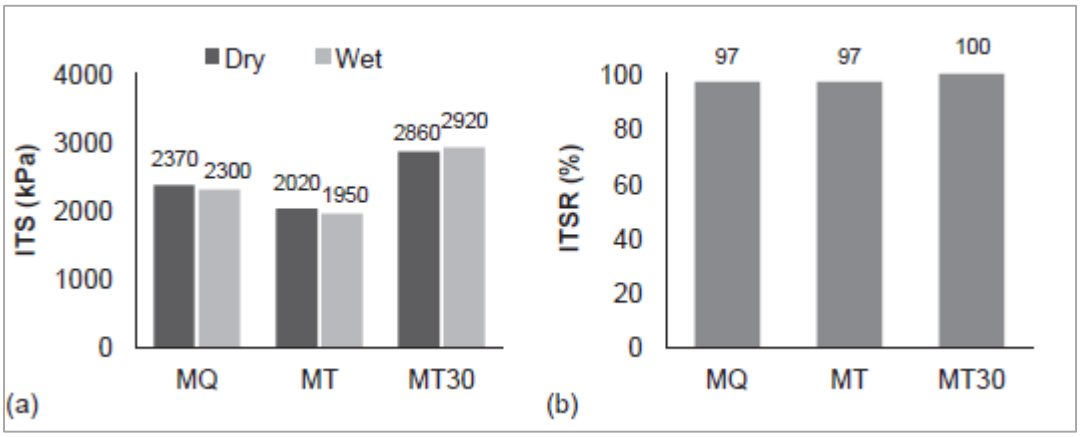


Figura 53 - Sensibilidad a la Humedad

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

En la Figura 53 se observa que la mezcla que incluye RAP presentó las mejores resistencias a la tracción indirecta y la menor sensibilidad a la humedad debido a su densidad; también se puede observar una tendencia de las mezclas tibias (sin RAP) a un menor desempeño.

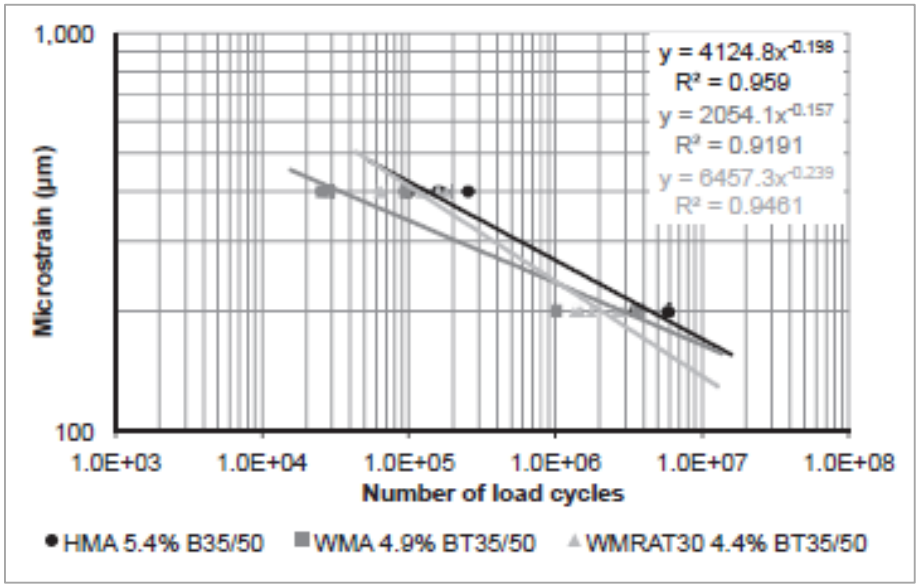


Figura 54 - Resistencia a la Fatiga

Fuente: (Dinis-Almeida & Afonso, 2015)

En los ensayos de resistencia a la fatiga Dinis-Almeida & Afonso (2015) confirmaron una vez más que al añadir RAP a las mezclas tibias, se mejora su desempeño, en la Figura 54 se observa que a pesar de observar como la resistencia a la fatiga de la mezcla con RAP y la mezcla caliente son similares inicialmente, la mezcla con RAP obtuvo mejores resultados en razón del material fino que posee, debido al proceso de fresado para su obtención a diferencia de lo determinado por Farooq & Mir (2017) quienes señalaron una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de RAP y la resistencia a la fatiga.

Rondón et al. (2015) generaron una caracterización de las mezclas tibias que incluyeron 20, 30, 40 y 50% de RAP, utilizando Marshall, módulo resiliente, susceptibilidad al agua con tracción indirecta (TSR) y pruebas de ahuellamiento, adicionando un aditivo químico al momento de generar el espumado del asfalto. Utilizaron una gradación correspondiente a una mezcla HMA-19 (tamaño máximo de los agregados 19mm) utilizando especificación INVIAS 2013, la gradación se muestra en la Tabla 32 y las características de asfalto utilizado (AC 60-70, PG 58-22) se presentan en la Tabla 33.

Tabla 32 - Gradación de la mezcla tibia

Tamiz (mm)		Porcentaje que Pasa HMA-19
19	3/4"	100
12.5	1/2"	87.5
9.5	3/8"	79
4.75	No. 4	57
2	No. 10	37
0.425	No. 40	19.5
0.18	No. 80	12.5
0.075	No. 200	6

Fuente: (Rondón et al., 2015)

Tabla 33 - Características del asfalto utilizado

Prueba	Metodología	Unidad	AC 60-70
Penetración (25°C, 100g, 5s)	ASTM D-5	0.1 mm	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	-0.7
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	52.5
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1752
Viscosidad a 135°C	AASHTO T-316	Pa-s	0.36
Gravedad específica	AASHTO T 228-04	-	1-016
Ductibilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>105
Solubilidad in tricloroetileno	ASTM D2042	%	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0.2
Punto de inflamabilidad	ASTM D-92	°C	275
Prueba de residuos después de RTFOT			
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0.47
Penetración del residuo depués de la pérdida por calentamiento, en porcentaje de la penetración original	ASTM D-5	%	72

Fuente: (Rondón et al., 2015)

El aditivo compuesto por material inorgánico a base de sílice se utilizó en cantidades de 0% y 1% con respecto a la cantidad de asfalto utilizado para las mezclas, este contenido de asfalto se definió como 5.3% en promedio para las mezclas tibias y 5.5% para las mezclas calientes, en la Figura 55 y la Tabla 34 se muestran los resultados del estudio:

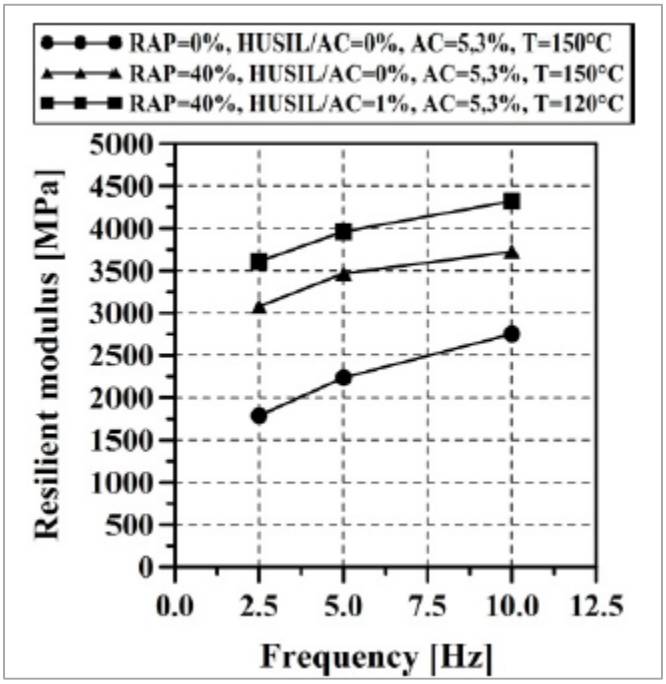


Figura 55 - Variación del módulo resiliente

Fuente: (Rondón et al., 2015)

Tabla 34 - Variación de la resistencia a la tracción indirecta

Mezcla	Resistencia seca (kPa)	Resistencia húmeda (kPa)	Tasa de resistencia a la tracción (%)
HMA-RAP	1273.4	1020.1	80.1
WMA-RAP	1358.8	1276.4	93.9

Fuente: (Rondón et al., 2015)

Según la Figura 55 Rondón, Urazán y Chávez (2015) señalaron que la adición de RAP a las mezclas asfálticas aumenta su módulo resiliente tal y como lo indicaron (Dinis-Almeida & Afonso, 2015) y (Farooq & Mir, 2017). Por otro lado según los datos de la Tabla 34 concluyeron que las mezclas tibias con RAP dan lugar a mejores resistencias a la tracción indirecta y menores susceptibilidades al agua concordando con lo observado por Dinis-Almeida & Afonso (2015), Kar et al. (2018), Zhao et al. (2013), Kusam et al. (2017) y Kranti, Gordon & Thom (2016).Zaumanis et al. (2016) dan una serie de recomendaciones para la elaboración de mezclas asfálticas que involucran RAP, las cuales se mencionan a continuación:

- Los agregados deben ser probados según los requerimientos que apliquen y se selecciona la fracción del RAP que permita cumplir con la granulometría,

se deben aplicar los mismos requerimientos a los agregados del RAP y a al material virgen.

- Extraer el asfalto del RAP para determinar sus propiedades y determinar la cantidad de asfalto requerido.
- Se mezcla y compacta el asfalto para determinar las propiedades volumétricas y sus prestaciones.

Señalan que un buen diseño no garantiza un buen comportamiento de la mezcla asfáltica, la calidad del producto se consigue mediante el adecuado manejo del RAP incluyendo control sobre el proceso de fresado, almacenamiento y controles de calidad en las operaciones de fabricación de la mezcla. Algunas de las operaciones más importantes son:

- Separar el RAP (agregados y asfalto) según su tipo, edad, etc.
- Minimizar el contenido de finos durante procedentes del proceso de fresado
- Controlar la variabilidad del material traído de la zona de disposición
- Reducir la humedad del material
- Eliminar los residuos y contaminantes obtenidos por el RAP durante su almacenamiento

2.6.1. Manejabilidad de WMA con RAP y HMA con RAP.

Con el fin de determinar el grado de cubrimiento de los agregados de la mezcla asfáltica tibia con espumado, Yin et al. (2014) realizaron pruebas de absorción de los agregados considerando que si los agregados se encuentran debidamente cubiertos por el asfalto, estos no deberían absorber agua. Por otro lado si la cobertura de los agregados es parcial se evidenciaría absorción de agua. El análisis de absorción se ejecutó sobre la fracción gruesa de los agregados y las características de las mezclas se presentan en la Tabla 33, para el caso de verificación de absorción de la mezcla; la misma fue sometida a un proceso de envejecido consistente en un calentamiento a 116°C durante 2 horas, durante este ensayo se contó con una mezcla caliente de control la cual fue sometida a un proceso de envejecimiento similar variando únicamente la temperatura a la que fue calentada siendo esta de 135°C según lo indicado en

la Tabla 34. Los agregados cubiertos con asfalto fueron sometidos a la prueba de absorción sin compactar, antes de sumergirlos en agua durante una hora se enfriaron a temperatura ambiente. Posteriormente se compararon la absorción de los agregados sin asfalto y de los agregados con asfalto para determinar así un «índice de cobertura» consistente en la relación dada por la ecuación 11:

$$\text{índice de cobertura} = \frac{\text{Absorción de los agregados} - \text{Absorción de la mezcla}}{\text{Absorción de los agregados}} \times 100 \quad \textbf{[7]}$$

Tabla 35 - Mezclas de control para índice de cobertura

Origen y Asfalto	Mezcla/Contenido de agua de espumado			
	HMA/0%	WMA/1%	WMA/2%	WMA/3%
N64-22	x	x	x	x
O64-22	x	x	x	x
Y64-22	x	x	x	x
N70-22		x		
O70-22		x		

Fuente: (Yin et al., 2014)

Tabla 36 - Temperaturas de mezclado y envejecimiento

Contenido de agua de asfalto	Temperatura de mezclado	Proceso de envejecimiento
0% (HMA)	143°C	135°C
1% (WMA)	135°C	116°C
2% (WMA)	135°C	116°C
3% (WMA)	135°C	116°C

Fuente: (Yin et al., 2014)

En la Figura 56 se muestran los resultados presentados en la Tabla 35 y la Tabla 36, si bien el origen del asfalto incidió en índice de cobertura de las mezclas, se puede observar como en forma general las mezclas con un contenido de agua para espumado de un 1% presentaron los mejores índices de cobertura.

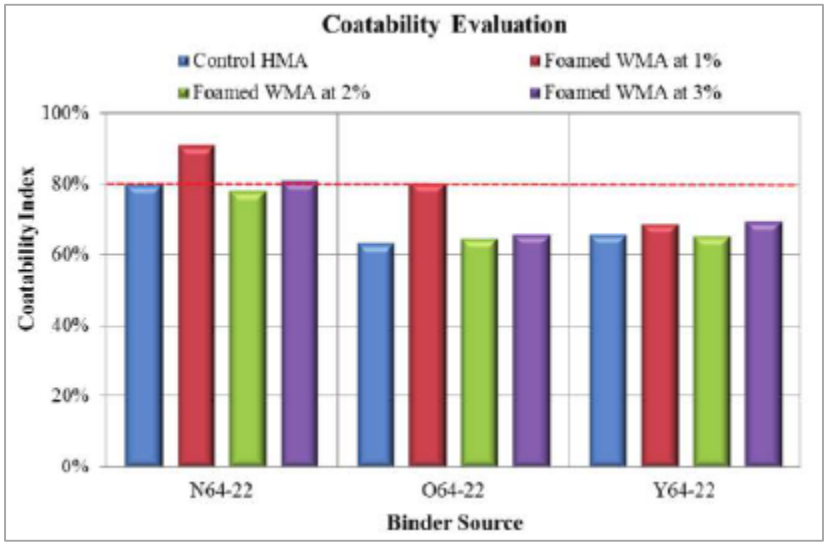


Figura 56 –Resultados de cobertura de agregados

Fuente: (Yin et al., 2014)

Braham et al. (2015) recalcando la importancia de la compactabilidad de las mezclas asfálticas en su desempeño a largo plazo y haciendo énfasis en la escaza investigación relacionada con la compactabilidad de mezclas tibias con contenidos altos de RAP, enfocaron su investigación en el análisis de este parámetro y compararon los resultados obtenidos con los arrojados por mezclas calientes con los mismos contenidos de RAP. Al referirse a la compactación mediante Superpave gyratory compactor (SGC) se deben considerar los siguientes términos:

- Compactation densification index →índice de -densificación por compactación (CDI)
  Identifica el área bajo la curva (energía) de densificación a partir de 8 giros hasta el número de giros requerido para alcanzar un 92% de la máxima gravedad específica (92%G_{mm}).
- Traffic densification index →Índice de densificación por tráfico (TDI)
  Se refiere al área bajo la curva (energía) a partir de los giros requeridos para obtener el 92% de la gravedad específica máxima hasta el número de giros requeridos para alcanzar el 98% de la gravedad específica máxima del material (98%G_{mm}).

A partir de esto se obtiene el valor «N92», el cual representa el número de giros requeridos para alcanzar el 92% de la gravedad específica teórica máxima.

En la Tabla 37 y en la Figura 57 se presentan las propiedades de las mezclas sometidas a compactación mediante el SGC.

Tabla 37 – Propiedades de las mezclas compactadas con SGC

Propiedades de la mezcla	HMA (virgen)	HMA (RAP)	WMA 1 (espumado)	WMA 2 (Aditivo químico)
Gs máx.	19	19	19	19
Número de giros por diseño	100	100	100	100
Rango de vacíos con aire	4.2-9.2	3.8-6.7	1.1-4.0	3.0-7.5
PG de diseño	76-28	64-28	64-28	64-28
Contenido de asfalto óptimo (%)	5.4	5.4	5.7	5.4
Contenido de asfalto de producción (%)	5.8	6.25	5.98	5.75
Contenido de RAP	-	35	35	35
Temperatura de mezclado °C	171	154	135	135
Temperatura de compactación	160	146	135	135
Tamiz (mm)	Diseño/Producción			
25	100/100	100/100	100/100	100/100
19	95/100	95/100	95/100	95/97
12.5	80/84	80/84	80/82	80/78
9.5	68/73	66/72	66/72	66/67
4.75	57/52	43/47	43/46	43/43
2.36	33/34	29/30	29/31	29/28
1.18	23/23	20/20	20/22	20/20
0.6	17/17	15/15	15/17	15/16
0.3	12/12	11/12	11/13	11/12
0.15	9.3/9.3	8.4/9.4	8.4/10	8.4/9.8
0.075	4.5/6.9	5.6/7.2	6.2/7.8	4.5/7.8

Fuente: (Braham et al., 2015)

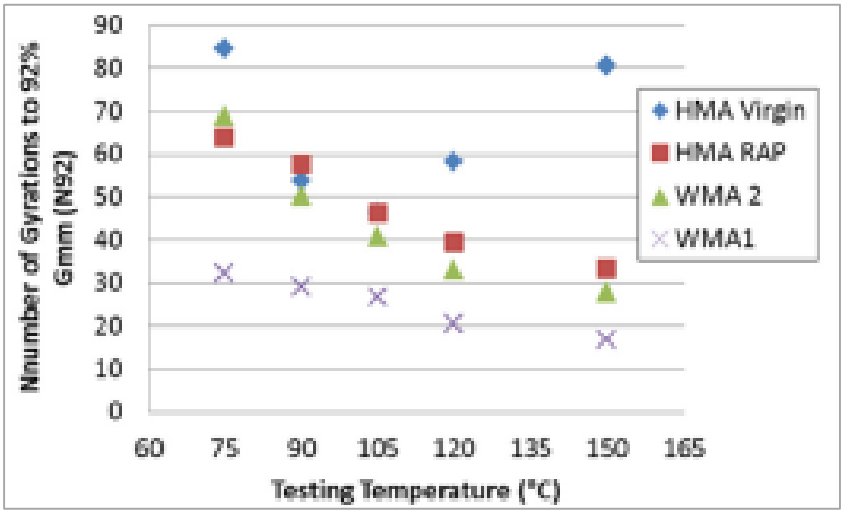


Figura 57 – Resultados de N92 para los distintos tipos de mezclas.

Fuente: (Braham et al., 2015)

De forma general se puede apreciar como las mezclas tibias facilitan la tarea de compactación, evidenciándose que la mezcla WMA 1 (RAP+aditivo+espumado) presentó el N92 más bajo; es decir que fue la mezcla que ofreció la mejor compactabilidad de todas en contraposición a la mezcla caliente de control que fue la que requirió mayores esfuerzos de compactación, llegando a ser incluso más difícil de compactar que la mezcla caliente con RAP.

En los resultados también se observa como la compactabilidad de la mezcla de control se comportó de forma parabólica en función de la temperatura, teniendo una compactabilidad óptima a aproximadamente 90°C. A pesar de esto, al agregar RAP a la mezcla caliente la compactabilidad de la misma adoptó un comportamiento lineal mejorando de manera proporcional con el aumento de la temperatura. Finalmente, Braham et al. (2015) concluyeron que para las mezclas con RAP la compactabilidad mejora de manera lineal con el aumento de la temperatura, las mezclas tibias con RAP presentaron mejores compactabilidades que las mezclas calientes con RAP, si bien la WMA 1 presentó mejor compactabilidad que la WMA 2, la diferencia entre el N92 de

cada una se reduce en la medida en que aumenta la temperatura de compactación sin que lleguen a ser iguales.

Kusam et al. (2017) utilizando el valor «N92» propuesto por la NCHRP en su reporte 691 y que corresponde al número de giros que requiere el compactador para que la muestra alcance una densidad del 92% del G_{mm} y que sirve como referencia para establecer la compactabilidad de la mezcla. En la Tabla 38 y en la Tabla 39 se presentan los resultados obtenidos según el porcentaje de RAP y la tecnología de mezcla tibia utilizada.

Tabla 38 - Valores de N92 para las mezclas analizadas

	Tecnología de mezclado		
RAP	HMA	EVO	Espumador
0%	17	15	16
20%	18	17	16
40% PG 64-22	23	19	16
40% PG 58-28	16	20	18

Fuente: (Kusam et al., 2017)

Tabla 39 - Variación porcentual del N92 en las mezclas analizadas

	Tecnología de mezclado		
RAP	HMA	EVO	Espumador
0%	Control	-12	-6
20%	6	0	-6
40% PG 64-22	35	12	-6
40% PG 58-28	-6	18	6

Fuente: (Kusam et al., 2017)

Como se puede observar en la Tabla 38 y la Tabla 39, la trabajabilidad de las mezclas tibias fue generalmente mejor en comparación con las mezclas calientes y esta superioridad aumenta en la medida en que se agrega una cantidad mayor de RAP. Sin embargo, para el asfalto con PG 58-28, la mezcla caliente obtuvo una trabajabilidad superior frente a la mezcla tibia. En cuanto a la tecnología con aditivo químico, la trabajabilidad con un 0% de RAP fue superior a las otras dos mezclas pero decreció de manera directamente proporcional a la cantidad de RAP en la mezcla.

Basándose en los datos de la Tabla 39 se puede observar que el aditivo químico es aprovechable en cantidades de RAP comprendidas entre el 0 y el 20% y que las mezclas calientes pierden mucha manejabilidad en función de la cantidad de RAP adicionada a menos que se realice con mezclas que posean asfaltos con un PG más bajo.

Daoudi et al. (2019) evaluaron la compactabilidad de mezclas tibias mediante el cálculo de un (índice de energía de compactación – CEI Compactation energy index) que es un valor análogo al CDI indicado por Braham et al. (2015). Sin embargo, su investigación aclara los siguientes puntos:

- Los ocho (8) primeros giros del compactador simulan la presión ejercida por un pavimentador común durante la instalación de la mezcla (pre-compactación).
- El cálculo de la energía bajo la curva a partir de los 8 giros hasta el número de giros requeridos para alcanzar el 92% de la compactación simula la energía con la que se compacta la mezcla in-situ. En la Figura 58 se presenta gráficamente la interpretación del CEI y el N92.

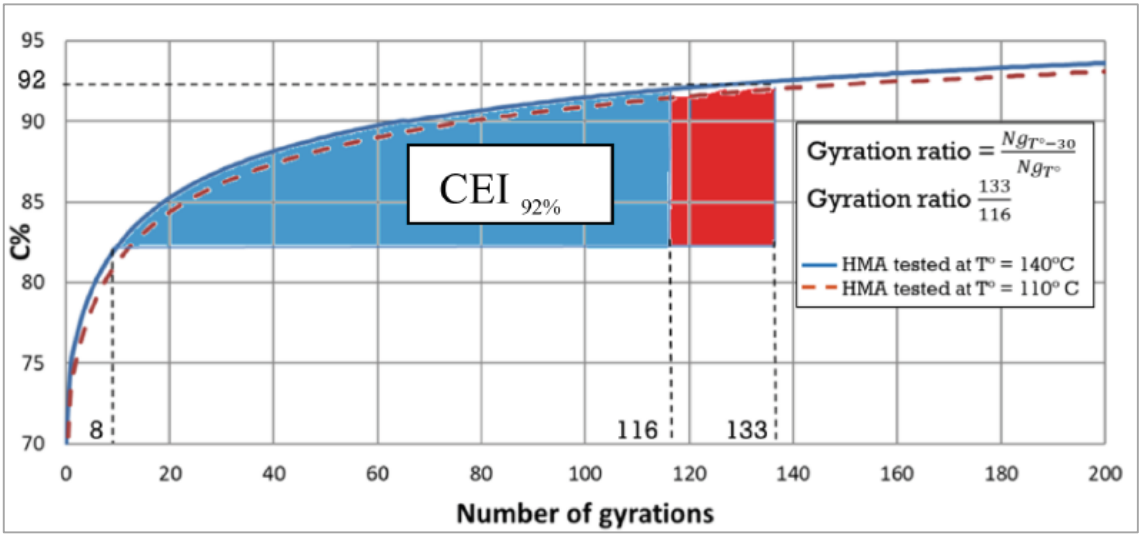


Figura 58 – Presentación gráfica del CEI

Fuente: (Daoudi et al., 2019)

Teniendo claros estos conceptos se propusieron comparar las compactabilidades de mezclas calientes y tibias a diferentes temperaturas, las mezclas consistieron en:

- Mezclas calientes → HMA
- Mezclas tibias con aditivo espumadas más aditivo químico →WMA WM30
- Mezclas tibias con espumado → WMA Foam

En la Figura 59 se presentan los resultados obtenidos por cada mezcla a las distintas temperaturas de compactación a las que fueron evaluadas.

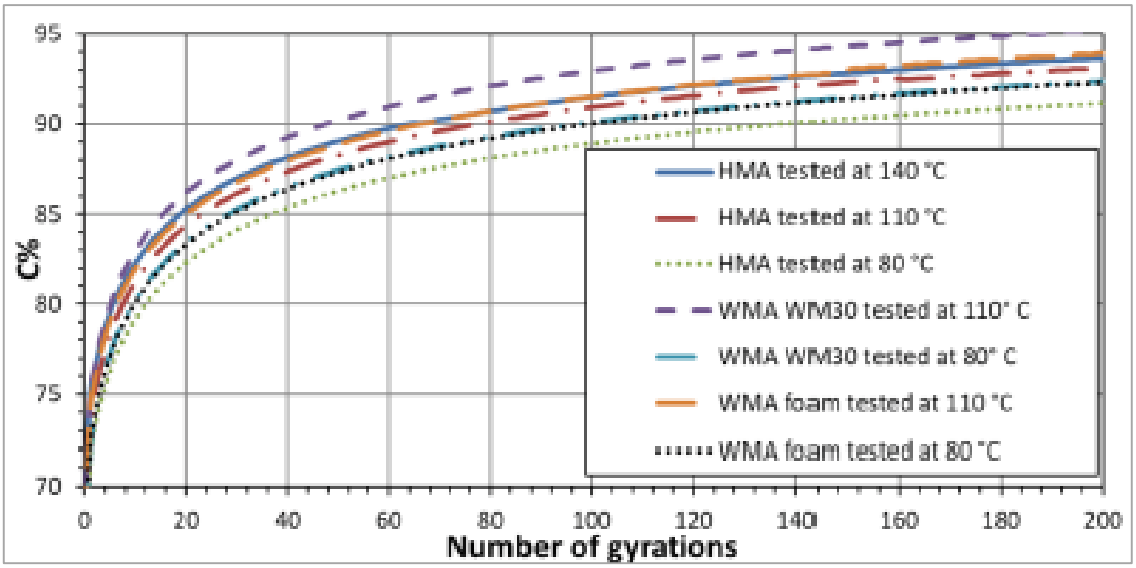


Figura 59 – Compactación vs Temperatura

Fuente: (Daoudi et al., 2019)

Al igual que lo observado por Braham et al. (2015), Daoudi et al. (2019) encontraron que las mezclas tibias ofrecen una mejor compactabilidad en comparación con las mezclas calientes. Se puede observar como la mezcla caliente compactada a 140° requirió el mismo número de giros para su compactación que la mezcla tibia con espumado a 110°C. También se observa como el aditivo fue efectivo sólo en temperaturas altas puesto que la mezcla tibia

con aditivo compactada a 80°C se comportó igual que la mezcla tibia sin aditivo a la misma temperatura.

Harman et al. (s. f.), durante el desarrollo de un taller con la FHWA, en el cual incluyeron las últimas recomendaciones dadas por la Superpave Lead States y cuyo objetivo se centró en la demostración del sistema de diseño desarrollado por el Strategic Highway Research Program (SHRP), en el cual se definieron una serie de parámetros «N», que se dividieron en «$N_{inicial}$», «$N_{diseño}$» y «$N_{máximo}$». Basándose en la cantidad de ejes equivalentes, se establecieron ciertas cantidades de giros para cada uno de estos «N» y se relacionó cada una de estas combinaciones con los usos más comunes de las vías que se diseñan con esta metodología, tal y como se observa en la Tabla 40.

Tabla 40 - Relación entre No. de ejes equivalentes y número de giros N

Ejes equivalentes de carga (millones)	Parámetros de compactación			Aplicaciones típicas
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$	
<0.3	6	50	75	Incluye vías con un volumen de tráfico muy ligero, vías rurales y calles urbanas con tráfico de vehículos pesados de muy ligero a nulo. El tráfico en estas vías se considera local, no regional, intraestatal y no interestatal. Vías con propósitos especiales como accesos a sitios recreativos.
0.3 a <3	7	75	115	Incluye vías colectoras o calles de acceso. Calles urbanas con un tráfico medio y vías rurales
3 a <30	8	100	160	Incluye vías de dos carriles, multicarriles, divididas y parcial o totalmente controladas por calles de acceso. Pueden ser vías urbanas que se encuentran en un rango entre medio a altamente transitadas y rutas interurbanas

Ejes equivalentes de carga (millones)	Parámetros de compactación			Aplicaciones típicas
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$	
≥30	9	125	205	Incluye a la mayoría de rutas interurbana de E.E.U.U., considerando vías rurales y urbanas. Vías con aplicaciones especiales como estaciones de pesaje de camiones.

Fuente: Harman et al., (s. f).

Una vez determinadas las combinaciones entre el número de ejes equivalentes de un diseño y la cantidad de giros asociados a cada valor de N, Harman et al., (s. f). procedieron a establecer el porcentaje de densidad teórica máxima asociado a cada combinación entre de cantidad de ejes equivalentes y número de giros del SGC, esto se ve reflejado en la Tabla 41.

Tabla 41 –Relación entre No. de giros N y porcentaje de densidad teórica

Ejes equivalentes de carga (millones)	Densidad requerida (porcentaje de gravedad específica máxima)		
	$N_{inicial}$	$N_{diseño}$	$N_{máximo}$
<0.3	≤ 91.5	96	≤98
0.3 a <3	≤ 90		
3 a <10	≤ 89		
10 a <30			
≥30			

Fuente: Harman et al., (s. f).

A partir de los datos contenidos en la Tabla 40 y la Tabla 41, se puede observar que para el diseño de una mezcla asfáltica que se utilice en vías con tránsitos medios a altos, la cantidad de giros que inicialmente deben generar el SGC ($N_{inicial}$), el cual está asociado a un 89% de densidad teórica máxima de la mezcla compactada, se encontrarán entre 7 y 9.

Dong et al. (2017) analizando mezclas con porcentajes de RAP del 0%, 20%, 40%, 60% y 80% evaluaron la viscosidad de las mezclas utilizando tecnologías HMA y WMA, mediante el uso de asfalto virgen con un grado de penetración

60/80 y material RAP que fue obtenido después de 5 años de servicio en una vía interurbana. Para la mezcla tibia se utilizó la técnica de espumado y la cantidad de agua para tal fin se fijó en un valor del 1.5%. Para el caso de las mezclas calientes primero se calentó el asfalto virgen a una temperatura comprendida entre los 120 y los 140°C y posteriormente se mezcló con el RAP a una temperatura de 150°C durante 30 minutos. Los aportes de este estudio se centran en que se reflejó claramente la diferencia de viscosidad entre las mezclas calientes y tibias y así mismo como el porcentaje de RAP utilizado influyó contundentemente en esta propiedad. Por ejemplo, se evidenció como las viscosidades de las mezclas calientes fueron siempre superiores a las de las mezclas tibias; es decir que las mezclas calientes siempre requirieron una mayor temperatura de mezclado y compactación, por otra parte en la medida en que se aumenta la cantidad de RAP en las mezclas también se aumenta la viscosidad la capa asfáltica como se puede apreciar en la Figura 60.

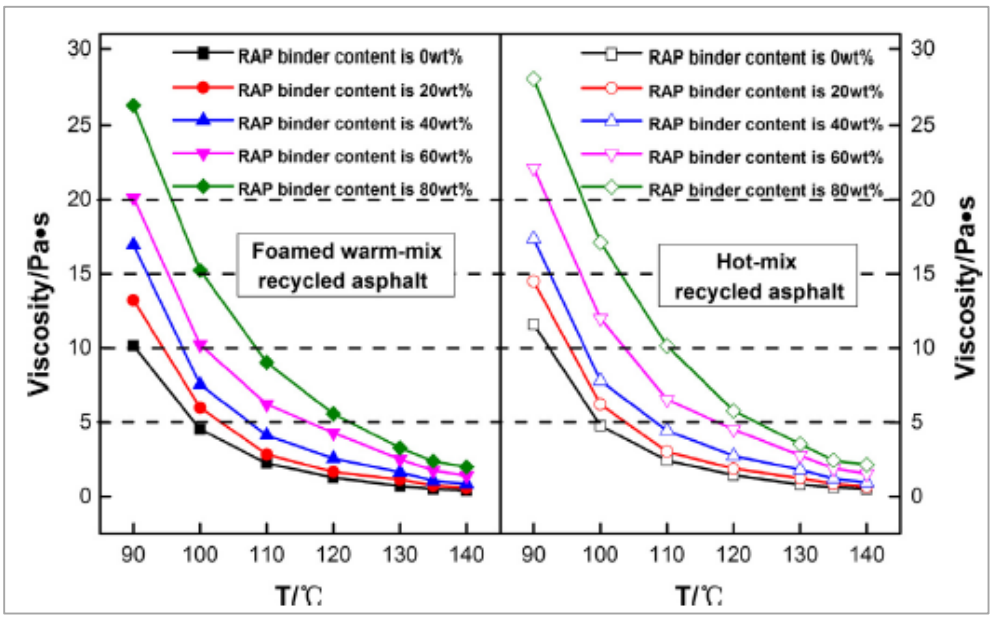


Figura 60 - Viscosidad WMA vs HMA

Fuente: (Dong et al., 2017)

Dong et al. (2017), también asociaron de manera indirectamente proporcional el contenido de RAP a la resistencia a la fatiga como se muestra en la Figura 61, destacando, sin embargo, que el contenido óptimo de material reciclado es

mayor en mezclas tibias en comparación con las mezclas calientes. Finalmente, destacan el efecto positivo que tiene la técnica del espumado (al ser mezcla tibia) en el envejecimiento de la mezcla elaborada.

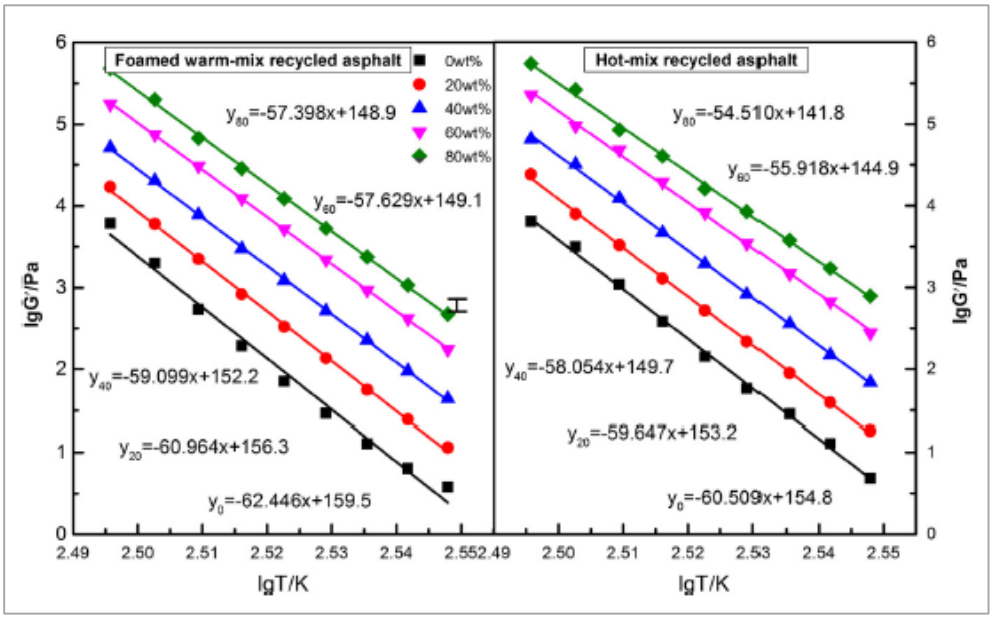


Figura 61 - Resistencia a la Fatiga WMA vs HMA

Fuente: (Dong et al., 2017)

2.6.2. Granulometría de mezclas que incluyen RAP

Un aporte interesante, debido al asunto en el que se reparó y a la poca atención que en las demás investigaciones suscitó este tema, es el realizado por Reyes Ortiz (2018) durante el desarrollo del convenio 467 de 2017 entre la Unidad de Mantenimiento Vial y la Universidad Militar Nueva Granda. Durante la elaboración de los ensayos propuestos con miras a estudiar la respuesta mecánica y dinámica de mezclas asfálticas fabricadas con RAP y material virgen, se propuso un procedimiento mezclar estas fuentes de material de tal manera que se garantizara una de las granulometrías establecidas en las especificaciones técnicas IDU (MDF-20), por lo que se llevó a cabo una corrección de la curva granulométrica introduciendo agregado virgen en la fracción gruesa delimitada por los tamices de 3/8 y 1 pulgada, puesto que como

se observa en los datos plasmados en la Figura 62, los agregados del RAP objeto de estudio no cumplían con lo exigido por las normas IDU.

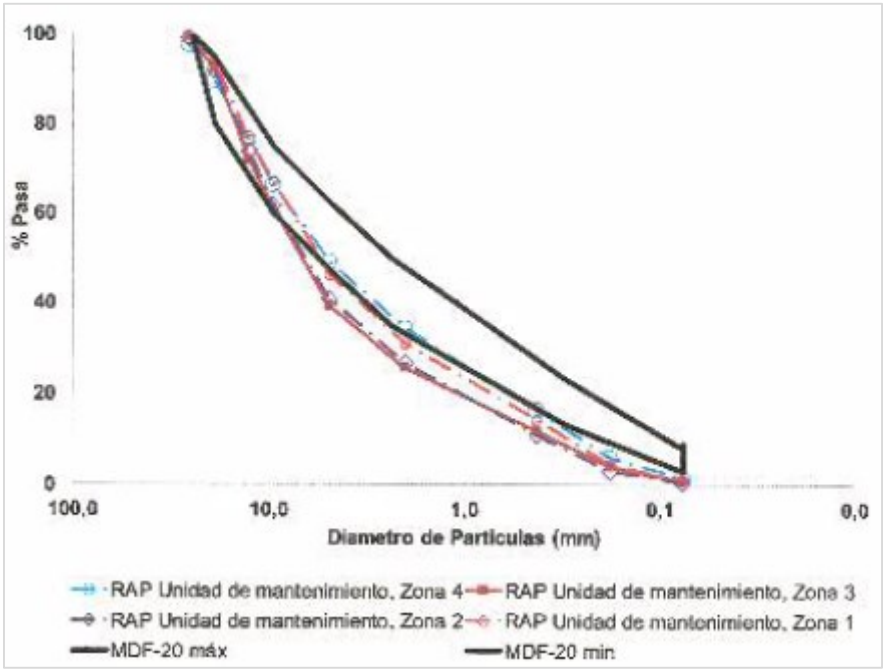


Figura 62 - Granulometrías del RAP del acuerdo 467

Fuente: (Reyes Ortiz, 2018)

En atención a este incumplimiento, se procedió como se había descrito anteriormente, agregando material virgen en la fracción gruesa como se muestra en la Tabla 42:

Tabla 42 - Inclusión de agregados vírgenes en el RAP

Tamiz	(mm)	Cantidad (%)	RAP 50%		RAP 75%		RAP 100%	
			RAP (%)	Virgen (%)	RAP (%)	Virgen (%)	RAP (%)	Virgen (%)
3/4	37.5	20	10	10	15	5	20	0
1/2	25	10	5	5	7.5	2.5	10	0
3/8	15.2	10	5	5	7.5	2.5	10	0
No. 4	4.75	13	13	0	13	0	13	0
No. 8	2	12	12	0	12	0	12	0
No. 50	0.43	22	22	0	22	0	22	0
No. 200	0.18	10	10	0	10	0	10	0
Fondo	0.075	3	3	0	3	0	3	0

Fuente: (Reyes Ortiz, 2018)

De esta forma, se consiguió mitigar los efectos que la variación de la granulometría genera en los distintos ensayos llevados a cabo durante esta investigación.

Está claro que las características y el porcentaje de RAP utilizado afectan de manera considerable el comportamiento de las mezclas asfálticas elaboradas como se puede observar en las discrepancias entre conclusiones de estudios similares, sin embargo es evidente que existe un consenso en cuanto a las ventajas de mezclar RAP con mezclas tibias, aportando rigidez y resistencia a la humedad. También parece existir un patrón marcado por las conclusiones de los estudios realizados, en cuanto a que el mejor aprovechamiento del RAP se consigue al mezclarlo para fabricar concretos asfálticos con la tecnología de mezclas asfálticas tibias, puesto que como se observó a lo largo de las diferentes investigaciones que conforman esta revisión del estado del arte, al agregar RAP a las mezclas calientes su desempeño mostró un declive contrario a lo observado en las mezclas tibias.

Adicionalmente, considerando los materiales que componen al RAP y teniendo en cuenta el impacto económico y ambiental de la extracción de estos componentes, así como su desempeño, se observa que la mejor manera de aprovechar el material RAP es mediante su uso como capa de rodadura en la estructura del pavimento. Por todo lo anteriormente mencionado, se identifica la

necesidad de realizar un estudio utilizando el material reciclado disponible a nivel local para observar su comportamiento inicialmente en aspectos básicos como lo son el ITS, TSR y el módulo resiliente.

3. Caracterización y preparación de materiales.

3.1. Caracterización del asfalto

3.1.1. Norma INV-E-706-13 «Penetración de los materiales bituminosos» y norma INV-E-712-13 «Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola)».

El asfalto usado en este estudio procede de la refinería de Apiay y clasifica por penetración como un asfalto 60-70. Sobre este material se realizaron los ensayos penetración (INV-706-13) y punto de ablandamiento (712-13), cuyos resultados se resumen en la Tabla 43.

Tabla 43 - Penetración y punto de ablandamiento del asfalto virgen

Ensayo	Resultado
Penetración (0.1mm)	65
Punto de ablandamiento (°C)	48.6

3.1.2. Norma INV-E-717-13 «Determinación de la viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro rotacional»

Siguiendo el procedimiento descrito en la norma, se evaluó la viscosidad del asfalto, obteniendo los resultados consignados en la Tabla 44 y en la Figura 63.

Tabla 44 - Viscosidad del asfalto virgen

Temperatura °C	Viscosidad (cP)	Viscosidad Pa-s
60	240625	241
120	818	0.818
130	475	0.475
140	276	0.276

Temperatura °C	Viscosidad (cP)	Viscosidad Pa-s
150	175	0.175
160	117	0.117

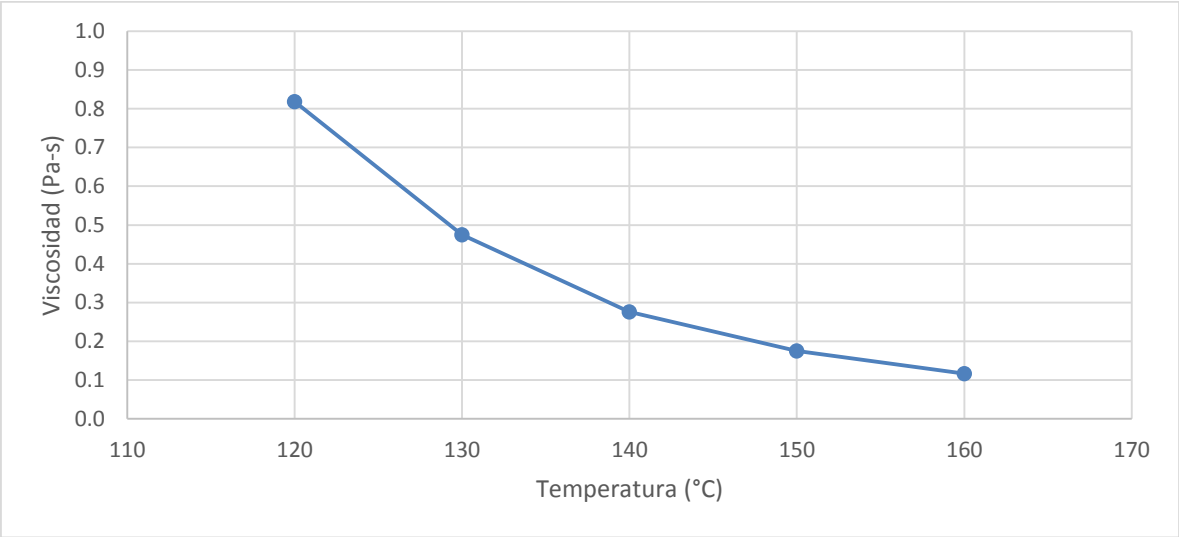


Figura 63 - Viscosidad del asfalto virgen

Los formatos diligenciados con los datos requeridos por las normas INVIAS para cada ensayo se encuentran en los Anexos del numeral 7.1.

3.2. Caracterización de la espuma de asfalto.

Un aspecto muy importante en la elaboración de mezclas asfálticas tibias tiene que ver con la caracterización de la espuma del asfalto. Esta caracterización se hace considerando dos parámetros principales que son la vida media y la tasa o relación de expansión. Para evaluar cada uno de estos, se varían las condiciones de temperatura del asfalto y la cantidad de agua inyectada, al momento de fabricación de la espuma. En la Figura 64 se presentan los datos obtenidos de vida media y tasa de expansión, según las temperaturas y contenidos de agua utilizados, cada uno de los puntos plasmados en la Figura 64 para una misma temperatura representan una variación en el porcentaje de agua utilizado para el espumado, representando el punto más alto de cada temperatura un 4% de agua y el más bajo 1%, pasando por 2% y 3%.

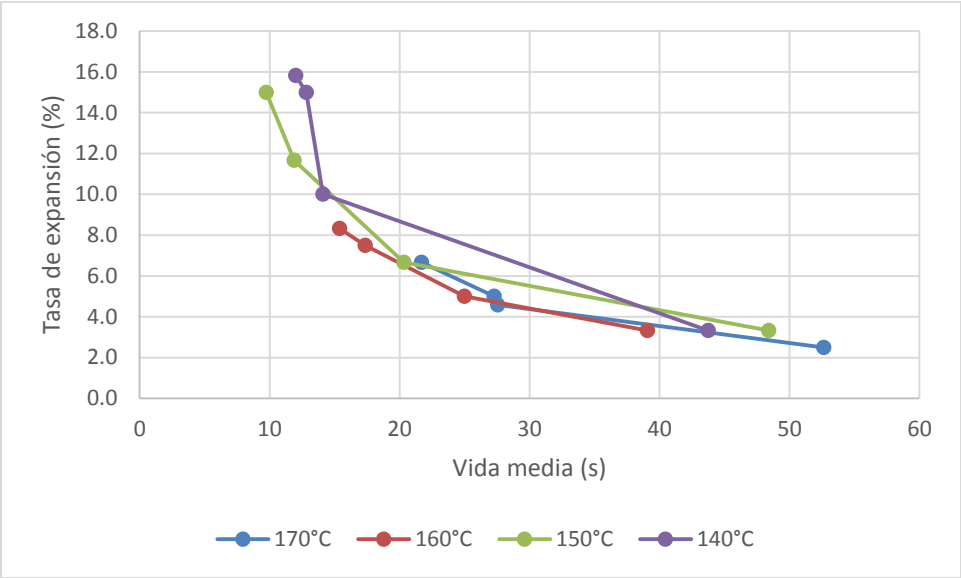


Figura 64 – Variación de la vida media y la tasa de expansión de la espuma de asfalto en función de la temperatura y el contenido de agua

Con base en los resultados obtenidos durante la caracterización, así como en la experiencia de L. P. F. Abreu et al., (2017), se estableció la temperatura óptima de espumado en 150 °C, con un contenido de agua de espumado del 3% valor semejante al propuesto por Wen et al., (2018) y respaldado por L. P. F. Abreu et al., (2017), lo cual a su vez garantiza una vida media próxima a los 10 segundos, valor sugerido por Sunarjono & Hidayati, (2018). En los Anexos del numeral 7.2 se presentan las gráficas y tablas con los valores de vida media y expansión de cada espuma de asfalto generada.

3.3. Caracterización de los agregados.

Los agregados usados en el estudio proceden del río Guayuriba y son empelados normalmente en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente en la ciudad de Bogotá, puesto que cumplen los requisitos del ARTÍCULO 450 del INVIAS, relativos a dureza, durabilidad, forma de partículas, etc. Para este estudio, se verificó la dureza con el ensayo de «desgaste en máquina de los Ángeles», obteniendo valores dentro del rango de lo exigido por la normativa del INVIAS en su tabla «450 - 3. Requisitos de los agregados para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua», tal y como puede apreciarse en Tabla 45.

Tabla 45 - Resultados de desgaste en máquina de «Los Ángeles»

Norma INV-E-218-13	
Tamaño máximo nominal de la muestra	**Pérdidas**
1"	17%
3/4"	21%

No se muestra análisis granulométrico puesto que previo a la fabricación de cada una de las mezclas se llevó a cabo un proceso de tamizaje para cumplir la franja granulométrica requerida por el INVIAS para una mezcla MDC-19 en su tabla «Tabla 450 - 6. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua».

Foto 1 – Disposición de agregados vírgenes- patio del CTU

El formato correspondiente al cálculo de desgaste y cumplimiento del requerimiento INVIAS se presenta en los Anexos del numeral 7.3.

3.4. Caracterización del RAP

Para la caracterización del asfalto envejecido del RAP, se realizaron los ensayos de Penetración, punto de ablandamiento siguiendo las normas INV-E-706-13 «Penetración de los materiales bituminosos» e INV-E-712-13 «Punto de ablandamiento de materiales bituminosos», cuyos resultados se presentan en la Tabla 46.

Tabla 46 – Penetración y punto de ablandamiento del asfalto del RAP

Ensayo	Resultado
Penetración (0.1mm)	23
Punto de ablandamiento (°C)	76.8

Posteriormente y con el fin de complementar la caracterización del asfalto proveniente del RAP, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la norma INV-E-717-13 «Determinación de la viscosidad del asfalto empelando el viscosímetro rotacional», cuyos resultados se presentan en la Tabla 47 y en la Figura 65.

Tabla 47 - Viscosidad del asfalto del RAP

Temperatura °C	Viscosidad (cP)	Viscosidad Pa-s
100	21514	21.514
120	20950	20.950
140	3365	3.365
160	904.9	0.904

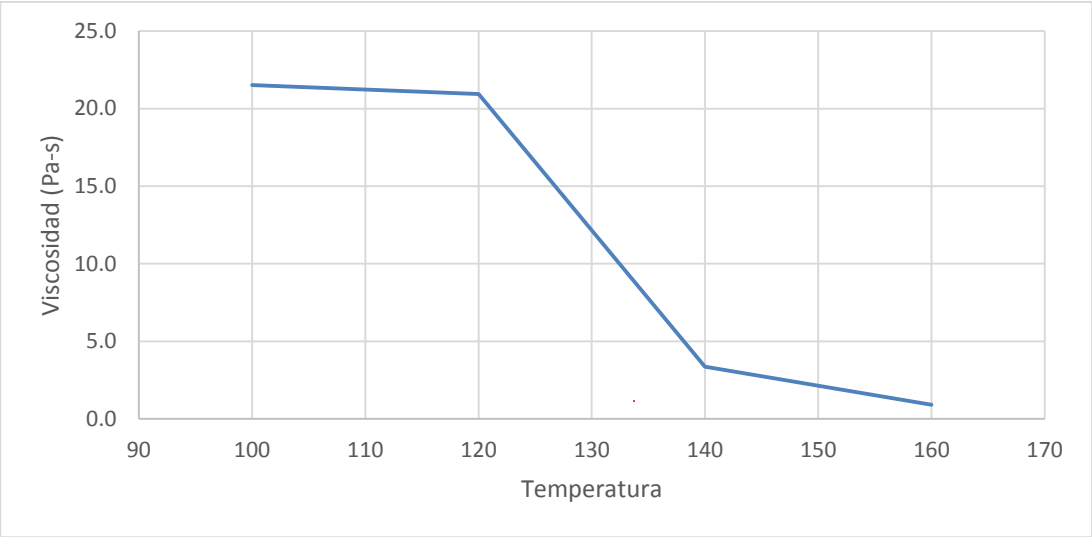


Figura 65 - Viscosidad del asfalto del RAP

Se puede observar como el asfalto proveniente del RAP presentó viscosidades mayores que las de un asfalto virgen convencional. Este comportamiento es el esperado, considerando el proceso de envejecimiento junto con su consiguiente rigidización por el tiempo que ha estado en servicio, coincidiendo con el desempeño de los asfaltos envejecidos ensayados por Dong et al., (2017).

Por otro lado, se hizo evidente como en general el comportamiento del asfalto recuperado presentó una mayor rigidez, requiriendo mayores temperaturas para fluir y ablandarse, así como una mayor resistencia a la penetración, la cual fue de tan solo la tercera parte de la penetración que se presupone podría tener el asfalto virgen que se uso para la elaboración de la mezcla asfáltica que conformaba la capa de donde se recuperó el RAP. Los formatos diligenciados con los datos requeridos por las normas INVIAS para cada ensayo se encuentran en los Anexos del numeral 7.4.1.

Una vez determinadas las características del asfalto proveniente del RAP, se llevó a cabo el procedimiento descrito en la norma INV-E-732-13 «Extracción cuantitativa del asfalto en mezclas para pavimentos», con el fin de establecer el contenido de asfalto del RAP, el cual una vez ejecutadas tres (3) extracciones, se estimó en 6.5% de asfalto por peso de RAP. Los formatos con los cálculos realizados se presentan en los Anexos del numeral 7.4.2.

Finalmente, se llevó a cabo el análisis granulométrico, para lo cual se realizaron los ensayos descritos en las normas INV-E-213-13 «Análisis granulométrico de los agregados grueso y fino» e INV-E-214-13 «Determinación de la cantidad de material que pasa tamiz de 75 µm (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado», para este análisis granulométrico se contemplaron dos (2) enfoques, el primero se centró en la granulometría del RAP (también denominado como «roca negra» en la bibliografía), es decir, la distribución de tamaños de las aglomeraciones de agregado y asfalto envejecido, obteniendo los valores que se indican en la Tabla 48 y en la Figura 66.

Tabla 48 - Granulometría del RAP

Especificación, tabla 450-6 – Capítulo 4, art. 450				**Requerido MDC-19**
Tamiz	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
3/4"	98%	100%	100%	Fuera de rango
1/2"	88%	95%	80%	Cumple
3/8"	80%	88%	70%	Cumple
No. 4	55%	65%	49%	Cumple
No 10	28%	45%	29%	Fuera de rango
No. 40	2%	25%	14%	Fuera de rango
No. 80	0%	17%	8%	Fuera de rango
No. 200	2%	8%	4%	Fuera de rango

En el segundo enfoque se tuvo en cuenta la granulometría propia de los agregados pétreos contenidos en el RAP, es decir, libres de asfalto, que se obtuvieron en las extracciones de asfalto descritas anteriormente. La granulometría obtenida se presenta en la Tabla 49 y en la Figura 66.

Tabla 49 - Granulometría de los agregados del RAP

Especificación, tabla 450-6 – Capítulo 4, art. 450				**Requerido MDC-19**
Tamiz	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
3/4"	100%	100%	100%	Cumple
1/2"	94%	95%	80%	Cumple
3/8"	87%	88%	70%	Cumple
No. 4	69%	65%	49%	Fuera de rango
No. 10	48%	45%	29%	Fuera de rango
No. 40	28%	25%	14%	Fuera de rango

Especificación, tabla 450-6 – Capítulo 4, art. 450				Requerido MDC-19
Tamiz	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
No. 80	17%	17%	8%	Cumple
No. 200	8%	8%	4%	Cumple

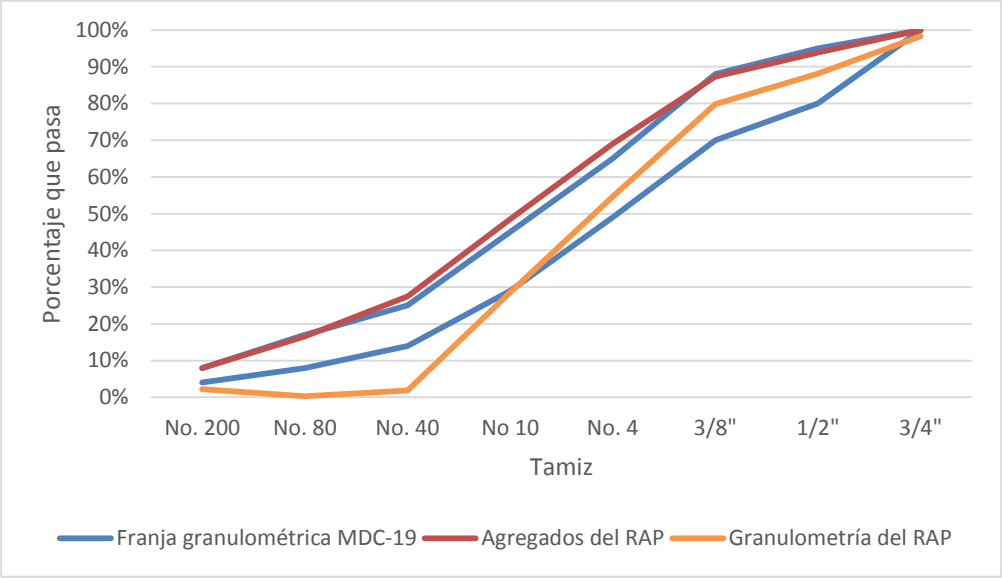


Figura 66 - Granulometría del RAP y de los agregados del RAP

Se puede apreciar la variación que presentó el hecho de evaluar la granulometría de la roca negra en comparación con la granulometría de sus agregados una vez se descarta el asfalto. La granulometría de los agregados del RAP se encuentra muy cerca de cumplir con los requerido por el artículo 450 del INVIAS para la elaboración de una mezcla MDC-19.

Considerando el ajuste granulométrico llevado a cabo en la investigación realizada por Reyes Ortiz, (2018), se propuso establecer una relación entre la granulometría de la roca negra y la de sus agregados. El objetivo principal de este procedimiento se centró en buscar la forma de reducir la incertidumbre de la granulometría utilizada durante la fabricación de cada una de las mezclas tibias con espumado que incluyen RAP en su fabricación, es decir, que la suma entre los agregados del RAP y los agregados vírgenes cumpliera con la franja granulométrica de una mezcla MDC-19. El primer paso consistió en producir una equivalencia entre la

«roca negra» y la granulometría de los agregados de este material, la cual se generó a partir del material utilizado durante los análisis de granulometría presentados en la Figura 66, puesto que se tomó una muestra representativa de «roca negra» y sobre esa misma muestra se llevaron a cabo los procesos de extracción de asfalto para determinar así la granulometría de los agregados contenidos en el RAP. En la Tabla 50 se presenta la equivalencia entre los tamizajes del mismo material, en la columnas «RAP» todavía contiene asfalto y en la columna «Agregados RAP» está libre del material ligante y solo se analizaron los agregados.

Tabla 50 - Equivalencia granulometrías roca negra- agregados RAP

	RAP (Roca Negra)	**Agregados RAP**
Tamiz	**% pasa**	**% pasa**
3/4"	98%	100%
1/2"	88%	94%
3/8"	80%	87%
No. 4	55%	69%
No 10	28%	48%
No. 40	2%	28%
No. 80	0%	17%
No. 200	2%	8%

A partir de estos datos, el procedimiento adoptado consistió en tomar muestras representativas de RAP, separadas por fracciones, de manera tal que presentara los mismos porcentajes de la columna «RAP (Roca negra)» de la Tabla 50 y asumir que la granulometría de agregados que aportó a la mezcla fue la presentada en la columna «Agregados RAP». Los formatos con los valores considerados para generar los valores presentados en la Tabla 50 se encuentran en los Anexos del numeral 7.4.3.

3.5. Comprobación de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente

Los valores de cumplimiento para las comprobaciones que se mencionan más adelante se encuentran establecidos en la tabla «450 - 10. Criterios para el diseño

preliminar de la mezcla asfáltica en caliente de gradación continua por el método Marshall» del artículo 450 del capítulo 4 de la normativa INVIAS.

3.5.1. Norma INV-E-748-13 «Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el aparato Marshall».

A partir de la recomendación dada por el proveedor del asfalto y los agregados para la mezcla, se llevó a cabo el procedimiento descrito para la compactación de la mezcla asfáltica en caliente con un 6% de asfalto por peso de mezcla, cumpliendo la cantidad de golpes por cara para su compactación (75) y realizando los ensayos de estabilidad y flujo requeridos. Como se resume en la Tabla 51. El valor medio obtenido por las probetas ensayadas correspondió a 16.751 N de estabilidad y 3.5mm de flujo, valores que se encuentran dentro de los requerimientos de la normativa INVIAS, estableciendo un valor mínimo de 7.500 N de estabilidad y un rango que va de 2.0 a 3.5 mm para el flujo. La última comprobación que requirió la norma INV-E-748-13 consistió en calcular la relación «estabilidad/flujo», admitiendo valores entre 3.0 a 6.0 kN/mm, para lo cual la mezcla ensayada obtuvo un valor medio de 4.84 kN/mm. Los datos base para la obtención de los valores descritos se presentan en los Anexos del numeral 7.5.1.

Tabla 51 - Estabilidad y flujo de la mezcla «MC»

Estabilidad	16.751 N
Flujo	3.5 mm
Estabilidad/flujo	4.84 kN/mm

3.5.2. Gravedades específicas de la mezcla asfáltica en caliente.

Una vez llevado el procedimiento descrito en la norma INV-E-733-13 «Gravedad específica Bulk y densidad de mezclas asfálticas compactadas no absorbentes empleando especímenes saturados y superficialmente secos», se calculó un valor de gravedad específica «Bulk» correspondiente a 2.22, por otro lado, la gravedad específica máxima obtenida por el procedimiento descrito en la norma INV-E-735-13 «Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos» se estableció en 2.33. A partir de estos valores y siguiendo el procedimiento descrito

en la norma INV-E-736-13 «Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas para pavimentos», se calculó el porcentaje de «vacíos con aire», el cual se estimó en 4.6%, el cual se encuentra dentro del rango establecido por la normativa INVIAS que va desde 4.0 a 7.0%, como se resumen en la Tabla 52. Los cálculos relativos a los resultados obtenidos se presentan en los Anexos del numeral 7.5.2.

Tabla 52 - Gravedades específicas y vacíos con aire - Mezcla «MC»

Gravedad específica Bulk	2.22
Gravedad específica máxima	2.33
Vacíos con aire	4.6%

Por lo tanto, siguiendo el contenido de asfalto propuesto por el proveedor de los materiales, así como las temperaturas requeridas por la norma INV-E-748-13 «Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall», las temperaturas de fabricación de la mezcla MC corresponden a 150°C para el asfalto y 160°C para los agregados.

3.6. Determinación de parámetros para mezclas tibias

Una vez establecidos los criterios de diseño de la mezcla convencional en caliente con agregados vírgenes (porcentajes de agregados retenidos en cada tamiz y contenido óptimo de asfalto), se procedió a la inclusión del RAP en los porcentajes planteados (40, 50 y 60%). Considerando el ajuste granulométrico planteado por Reyes Ortiz, (2018) y la equivalencia presentada en la Tabla 50, se procedió a tomar como base la granulometría de los agregados del RAP, a partir de la cual se determinó la cantidad de agregados vírgenes que debían aportarse en cada fracción con el fin de completar el peso de agregados necesario para la elaboración de las briquetas requeridas y generar una fracción granulométrica media según los valores requeridos en la tabla «450 - 6. Franjas granulométricas para mezclas asfálticas en caliente de gradación continua» de la normativa INVIAS.

El procedimiento realizado se describe desglosa más adelante:

1- Se establecieron los porcentajes de RAP y de asfalto para alcanzar el óptimo en la mezcla, considerando que cada briqueta contó con una masa de 1.200g y se requerían tres (3) por cada ensayo.
2- A partir de estos datos se calcularon las masas de asfalto envejecido en la mezcla y de agregados aportados por el RAP en cada fracción.
3- Se determinó la cantidad de asfalto virgen requerido para obtener el contenido de asfalto óptimo en mezcla.
4- Se calculó la cantidad de agregados vírgenes requeridos en cada una de las fracciones señaladas para cumplir con la granulometría de la media de la especificación de una MDC-19, siendo necesario aportar material en cada uno de los tamices.

En la Figura 67 y la Tabla 53 se presenta la distribución de los materiales que componen las mezclas analizadas.

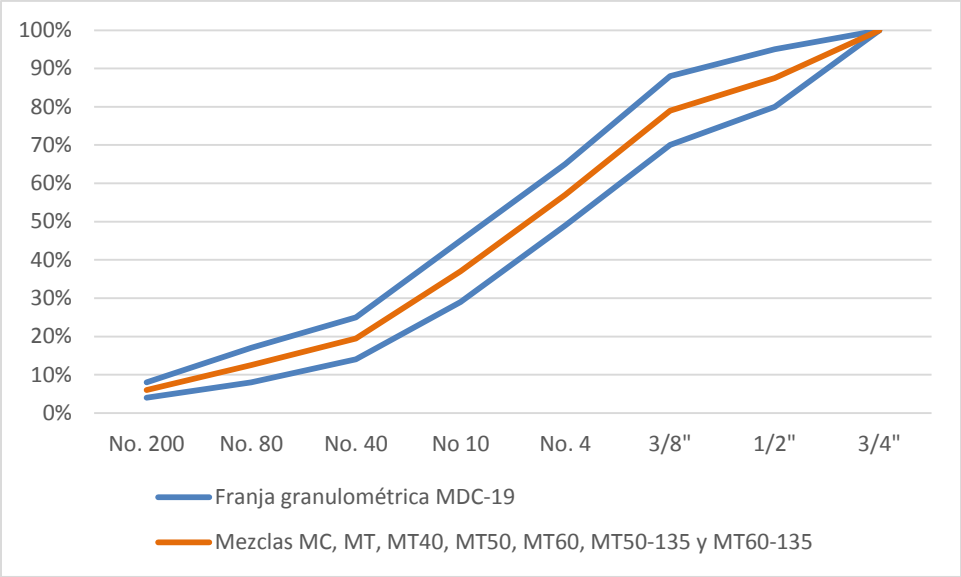


Figura 67 – Franja granulométrica estimada de las mezclas analizadas

Tabla 53 - Distribución de material reciclado y virgen en mezclas con RAP

Contenido de RAP	40%	50%	60%
Contenido óptimo de asfalto	6%	6%	6%
Briqueta (g)	1200	1200	1200

Asfalto aportado por el RAP (g)	31.2	39	46.8
Agregados aportados por el RAP (g)	448.8	561	673.2
Asfalto Virgen (g)	40.8	33	25.2
Agregados Vírgenes (g)	679	567	455

3.6.1. Determinación de temperaturas de compactación de la mezcla según su N92

Con el fin de determinar la compactabilidad de las mezclas tibias con espumado que incluyeron RAP en su fabricación, se procedió a evaluar la cantidad de giros requeridos por el «Superpave Giratory Compactor» durante el proceso de compactación para alcanzar el 92% (N92) de la densidad máxima calculada mediante el ensayo establecido en la norma INV-E-735-13 «Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos», cuyo resultado fue presentado en el numeral 3.5.2.

Para la realización de la comprobación en mención, se utilizaron los parámetros de espumado óptimos establecidos a partir del procedimiento descrito en el numeral 3.2, esto es, temperatura del asfalto para espumado de 150°C con un contenido de agua del 3%. Así mismo, el contenido de asfalto óptimo también fue un valor constante y el procedimiento para su determinación fue detallado en el numeral 3.5.1. Teniendo estos parámetros ya establecidos, se varió únicamente la temperatura a la que se calentaron los agregados (tanto material virgen como el RAP) previo al proceso de añadir el asfalto virgen por medio del proceso de espumado, las temperaturas a las que se comprobaron las características de compactabilidad de la mezcla fueron 100°C, 120°C y 140°C.

3.6.1.1. Compactabilidad según el contenido de RAP

En el presente numeral se muestran las variaciones encontradas en las distintas mezclas tibias con espumado y RAP en la medida en la que se variaba la temperatura de los agregados que las componían. La mezcla tibia sin RAP no fue considerada, puesto que al carecer de RAP se espera que su compactación se

asemeje a la de la mezcla de control o que en ningún caso presente una menor compactabilidad a la de las mezclas que si fueron fabricadas con RAP. Por lo tanto, la temperatura de agregados seleccionada más adelante, aplicará para todas las mezclas tibias, sin importar su concentración de RAP.

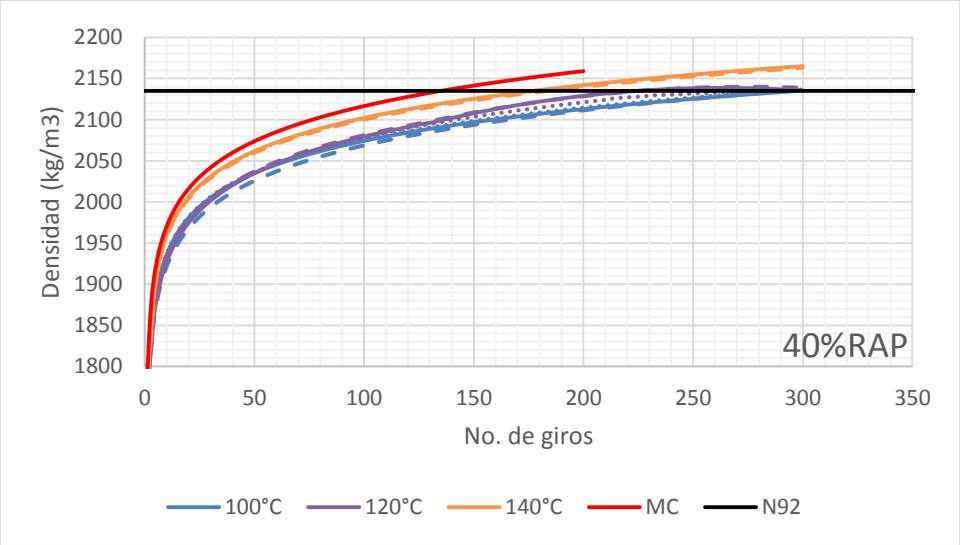


Figura 68 - Compactabilidad de la mezcla MT40

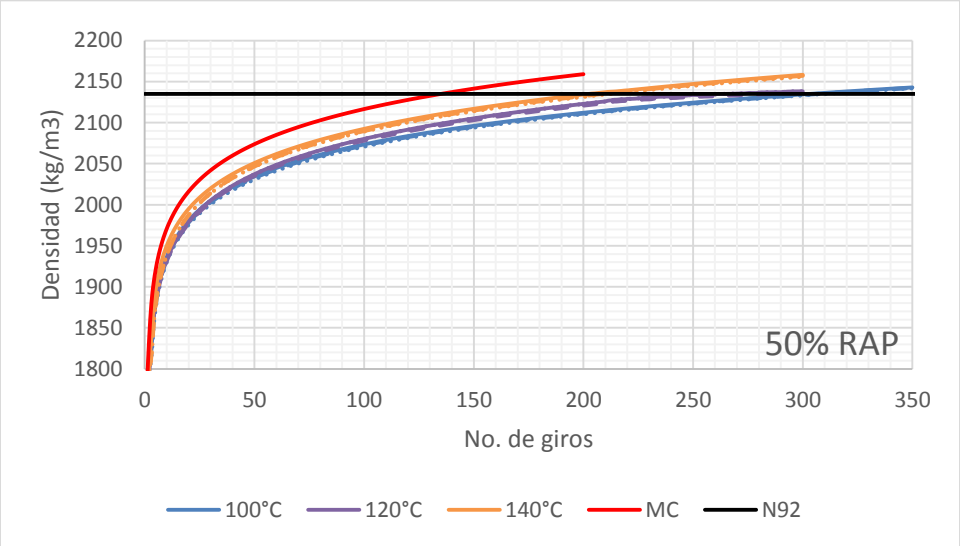


Figura 69 - Compactabilidad de la mezcla MT50

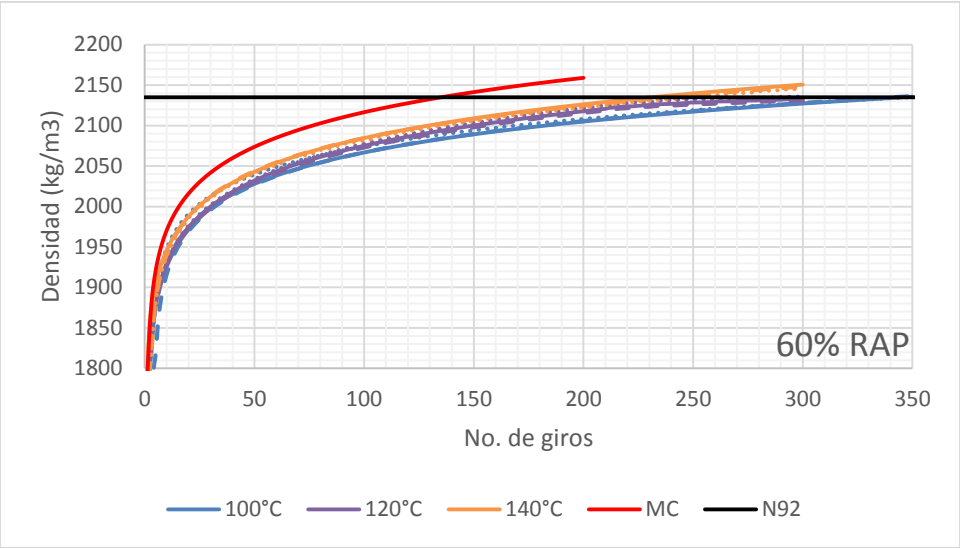


Figura 70 - Compactabilidad de la mezcla MT60

Tabla 54 - Número de ciclos para N92 según contenido de RAP

Mezcla	Temperatura de agregados	No. de giros para N92
MT40	100°C	293
	120°C	233
	140°C	180
MT50	100°C	307
	120°C	263
	140°C	208
MT60	100°C	345
	120°C	289
	140°C	231
MC	160°C	133

Según los datos presentados, la temperatura de agregados de 140°C fue la que más favoreció la compactabilidad de las distintas mezclas analizadas, puesto que se hizo evidente una relación inversamente proporcional entre el número de giros requeridos para alcanzar N92 y la temperatura de los agregados. Al aumentar la temperatura de 100°C a 120°C, la compactabilidad mejoró en un 38% para la mezcla con 40% de RAP y un 32% para las mezclas con 50 y 60% de RAP. Esta condición es de gran importancia, puesto que según las características particulares de un proyecto en el que se estén utilizando mezclas con RAP, podría evaluarse si es más favorable reducir la compactabilidad para poder utilizar temperaturas menores en la

fabricación de la mezcla o si por el contrario sería más conveniente aumentar la temperatura de fabricación con el fin de facilitar la compactación.

3.6.1.2. Compactabilidad según temperatura de agregados

Por otro lado, se puede evaluar la variación en la cantidad de giros requeridos para alcanzar N92 en función del contenido de RAP de cada mezcla según la temperatura de agregados utilizada, en la Tabla 55 se presentan el resumen de los datos obtenidos:

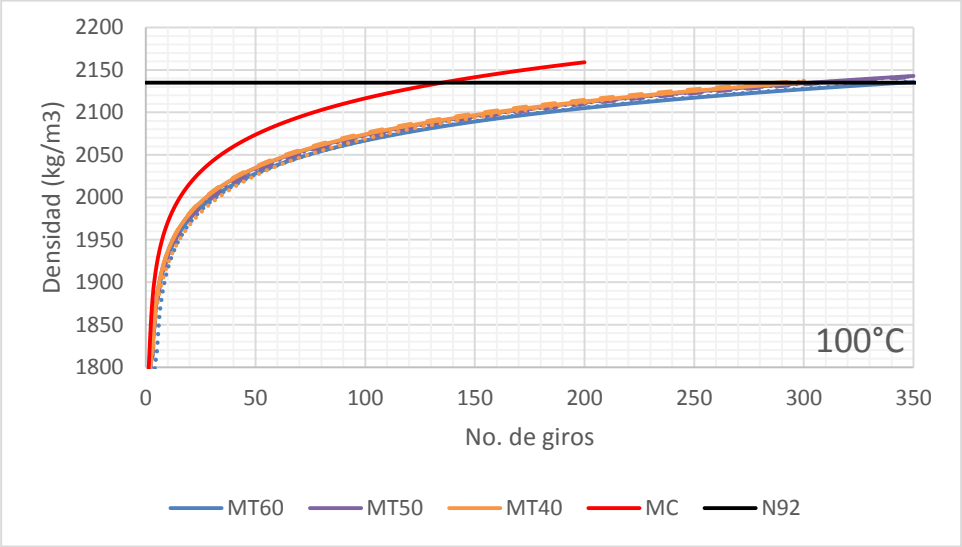


Figura 71 - Compactabilidad de las mezclas tibias propuestas con agregados a 100°C

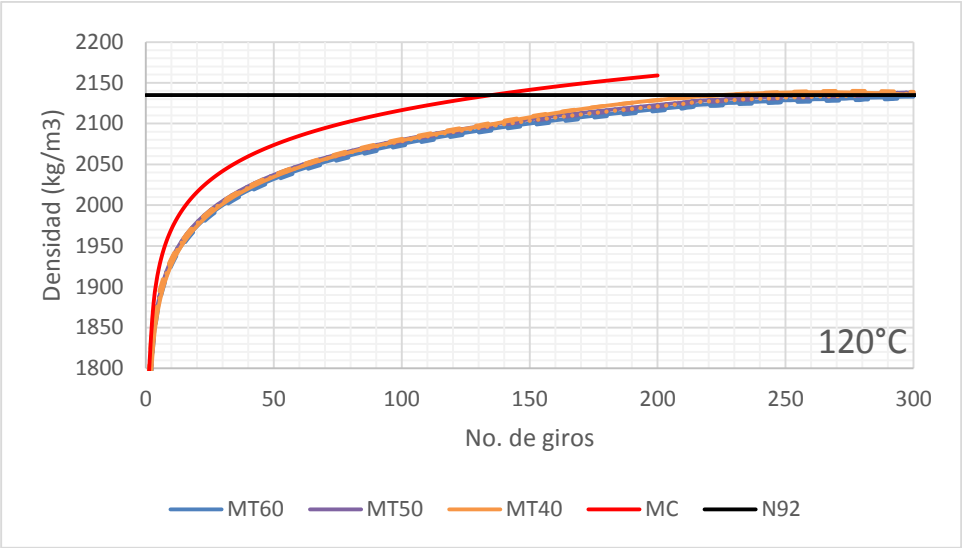


Figura 72 - Compactabilidad de las mezclas propuestas con agregados a 120°C

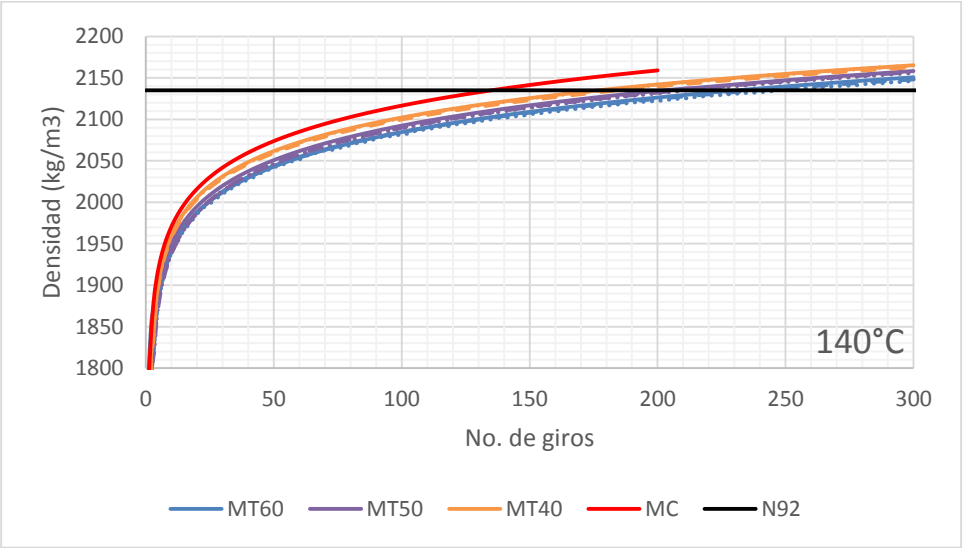


Figura 73 - Compactabilidad de las mezclas propuestas con agregados a 140°C

Tabla 55 – Número de ciclos para N92 según temperatura de agregados

Temperatura	Contenido de RAP	No. de giros para N92
100°C	40%	293
	50%	307

Temperatura	Contenido de RAP	No. de giros para N92
	60%	345
120°C	40%	233
	50%	263
	60%	289
140°C	40%	180
	50%	208
	60%	231
150°C	MC 0%	133

Los datos presentados en la Tabla 55 – Número de ciclos para N92 según temperatura de agregados permiten apreciar fácilmente el efecto que tiene el RAP en la compactabilidad de las mezclas, presentando un comportamiento directamente proporcional entre la cantidad de RAP y el número de giros necesarios para alcanzar el N92 de la mezcla. En la condición más favorable, es decir con agregados a 140°C, la mezcla con 60% de RAP requirió 98 giros más, es decir, un 42% más de giros para su compactación en comparación con la mezcla caliente de control, en tanto que para la mezcla con 40% de RAP y 140°C de temperatura en sus agregados, esta diferencia fue de tan solo 47 giros, es decir, un 26%. Los resultados de compactabilidad de cada mezcla se presentan en el Anexo del numeral 7.6.

3.6.2. Análisis de cubrimiento de agregados por el asfalto

Con el fin de determinar el cubrimiento de los agregados por el asfalto, en las distintas mezclas fabricadas, se llevaron a cabo ensayos para determinar la absorción de las mezclas según el procedimiento descrito en la norma INV-E-223-13 «Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado grueso». Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 56.

Tabla 56 – Resultados de absorción de las mezclas asfálticas según su temperatura

Temperatura de fabricación	Mezcla	Absorción (%)
150°C	MC	0.31
140°C	MT	0.43

Temperatura de fabricación	Mezcla	Absorción (%)
100°C	MT40	0.40
120°C		0.39
140°C		0.38
100°C	MT50	0.39
120°C		0.38
140°C		0.37
100°C	MT60	0.39
120°C		0.37
140°C		0.35

Según los datos presentados en la Tabla 56, la absorción de las mezclas disminuyó en la medida en que aumentó la temperatura de fabricación, por otro lado, también se observó que la mezcla tibia con espumado y sin RAP presentó un valor de absorción mayor a aquellas mezclas tibias con espumado que sí incluyeron RAP.

Considerando los datos de la Tabla 55 y la Tabla 56, se establece la temperatura de 140°C como la más apropiada para la elaboración de las mezclas tibias.

4. Resultados y Análisis

4.1. Ensayos de desempeño de mezclas

4.1.1. Norma INV-E-725-13 «Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta»

En la Tabla 57, se presentan los resultados de «resistencia a la tensión» para cada uno de los tipos de mezcla propuestos:

Tabla 57 - Resultados de los ensayos de tensión

Mezcla	Temperatura de fabricación	Resistencia a la tensión en condición seca (kPa)	Resistencia a la tensión en condición húmeda (kPa)	Relación de resistencias a la tensión
MC	150	1453.1	1187.1	82%
MT	140	1239.3	783.9	63%

Mezcla	Temperatura de fabricación	Resistencia a la tensión en condición seca (kPa)	Resistencia a la tensión en condición húmeda (kPa)	Relación de resistencias a la tensión
MT40	140	1450.9	1162.9	80%
MT50	140	1700.8	1482.4	87%
MT60	140	1799.5	1609.2	89%
MT50-135	135	1428.8	1009.2	71%
MT60-135	135	1435.5	1132.0	79%

Los datos de resistencia a la tensión en condición seca de la Tabla 57, se pueden observar en la Figura 74.

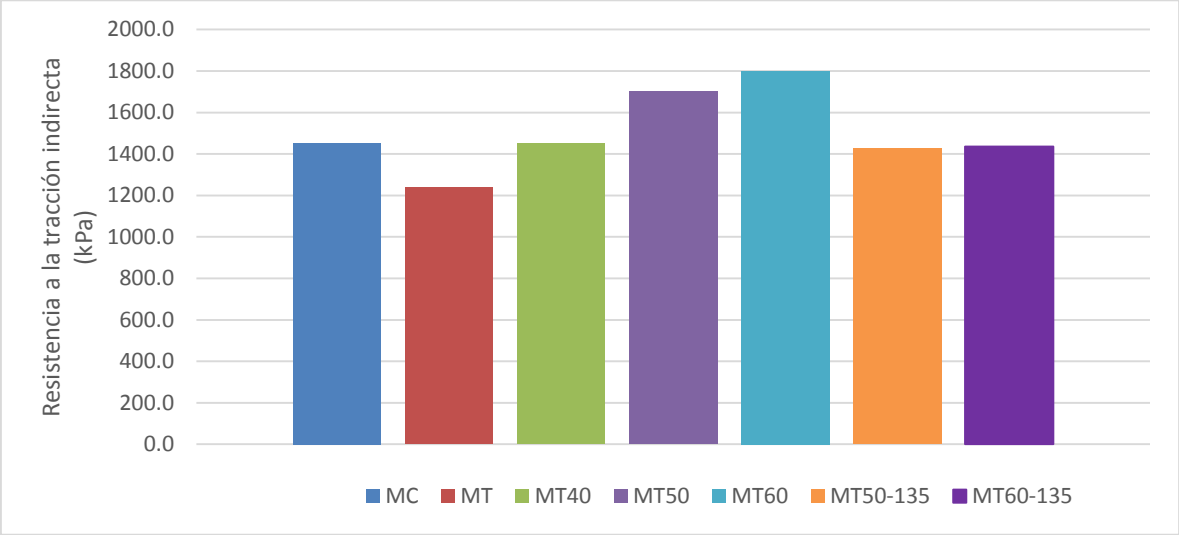


Figura 74 – Resultados de resistencia a la tensión en condición seca

A partir de los datos presentados anteriormente, se puede observar como el proceso de espumado genera que la mezcla asfáltica logre una resistencia menor a la tracción indirecta, sin embargo, en la medida en que se agrega RAP, esta resistencia aumenta. Así mismo se puede observar que la relación entre la cantidad de RAP y la resistencia a la tracción presentó un comportamiento no lineal, puesto que la diferencia entre la resistencia del grupo de mezclas en las que se incluyó un 40% de RAP frente a las que se elaboraron con un 50% de RAP a 140°C fue de 259.9 kPa, en tanto que, la diferencia entre las mezclas fabricadas con un 50% de RAP y un 60% elaboradas a 140°Cde RAP fue de tan solo 98.7 kPa. Por otro lado, las mezclas elaboradas a 135°C con 50% y 60% de RAP, obtuvieron resistencias muy

similares a la de la mezcla con 40% de RAP fabricada a 140°C y no se observó una diferencia considerable entre la resistencia de la mezcla con 50% de RAP frente a la que incluyó 60% de RAP.

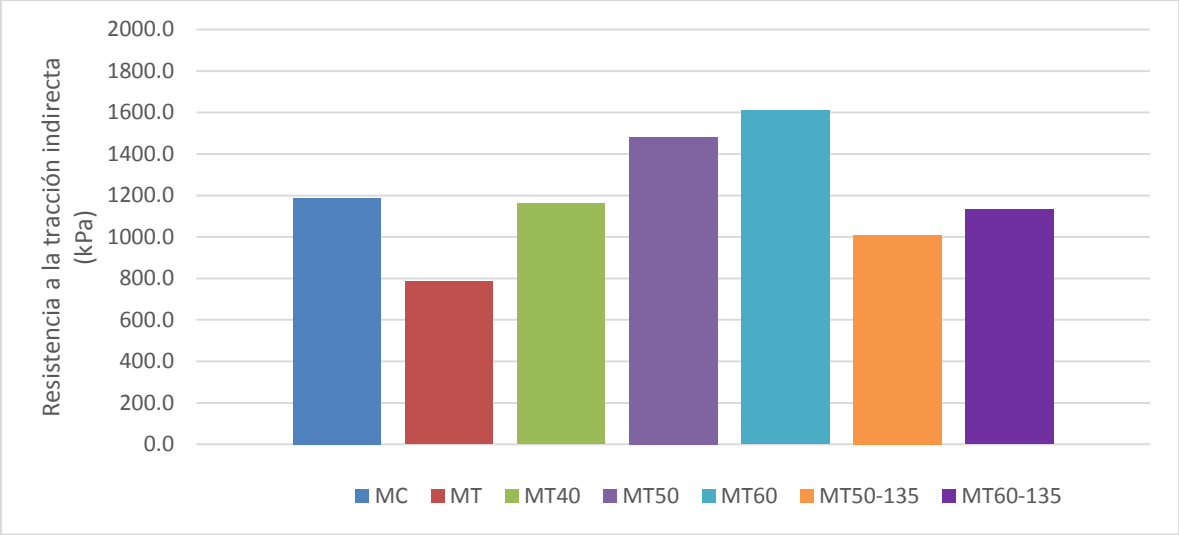


Figura 75 – Resultados de resistencia a la tensión en condición húmeda

Al analizar las resistencias a la tensión en condición húmeda presentadas por las diferentes mezclas que se sometieron a ensayo, se observó el mismo patrón de comportamiento encontrado en los ensayos de tensión en condición seca, es decir, la mezcla tibia con espumado presentó la menor resistencia y nuevamente se pudo comprobar como la inclusión de RAP mejoró este parámetro. Por otro lado, nuevamente se encontró una relación no lineal entre la resistencia a la tracción y la cantidad de RAP, siendo mayor el aumento de resistencia al pasar de 40% de RAP a 50% de RAP (319.5 kPa) que la resistencia ganada al pasar de 50% de RAP a 60% de RAP (126.8 kPa) para las mezclas fabricadas a 140°C, sin embargo, en el caso de las mezclas fabricadas a 135°C a diferencia de lo ocurrido en la condición seca, sí se pudo apreciar una variación considerable entre las resistencias de la mezcla con 50% de RAP frente a la que contenía 60% de RAP, siendo esta diferencia de 122.8 kPa. Adicionalmente, la mezcla con 60% de RAP compactada a 135°C obtuvo una resistencia menor a la de la mezcla elaborada a 140°C con 40% de RAP.

En la Figura 76 se presentan las relaciones obtenidas al comparar la resistencia a la tensión en húmedo frente a la resistencia a la tensión obtenida en condición seca o «TSR» por sus siglas en inglés (tensile strength ratio). Los formatos con los de las resistencias de cada una de las mezclas y las fotografías de las briquetas ensayadas en «condición húmeda» se encuentran en el Anexo del numeral 7.7.

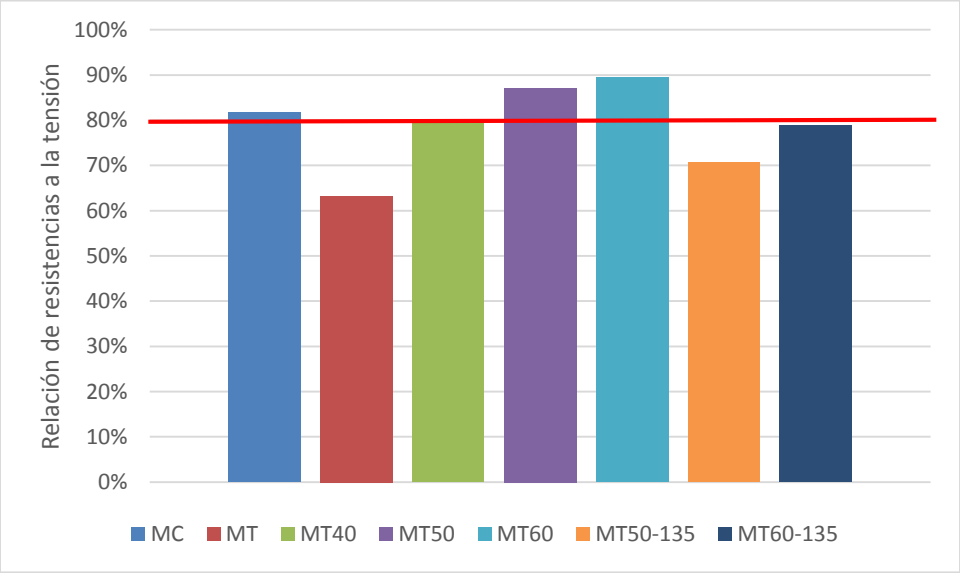


Figura 76 - Relaciones de resistencia a la tensión (TSR)

La relación denominada TSR sirve para determinar la susceptibilidad a la humedad de la mezcla asfáltica, la cual según el numeral 450.5.2.4.5 «Susceptibilidad a la humedad» del artículo 450 del capítulo 4 de la normativa INVIAS, debe ser de por lo menos 80%. Considerando este umbral de cumplimiento, se hace evidente que la mezcla tibia con espumado y 0% de RAP presentó un valor de TSR menor al requerido, por otro lado, todas las demás mezclas tibias con espumado y RAP fabricadas a 140°C cumplieron con el valor mínimo de TSR de 80%. En cuanto a las mezclas fabricadas a 135°C, se pudo apreciar un aumento en su susceptibilidad a la humedad en comparación con las mezclas con igual concentración de RAP y mayor temperatura de fabricación (140°C), lo que llevó a que ninguna de las mezclas fabricadas a 135°C (con 50% y 60% de RAP) lograra el valor mínimo de TSR, sin embargo, en el caso de la mezcla fabricada a 135°C con 60% de RAP el incumplimiento se dio por un 1.1%. Es importante destacar que la inclusión de RAP

en las mezclas tibias con espumado redujo la susceptibilidad al agua, coincidiendo con el comportamiento encontrado por Zhao et al., (2013) en su investigación.

4.1.2. Estimación del trabajo de fracturación.

Con el fin de obtener un parámetro que de mayor claridad frente al comportamiento y resistencia de las mezclas elaboradas, siguiendo lo sugerido por Wu et al. (2019), se buscó evaluar el trabajo requerido por cada tipo de mezcla para llegar al fallo, la metodología empleada para tal fin consistió en obtener la curva de esfuerzo vs deformación. Una vez graficados estos valores, se obtuvo una línea de tendencia con su respectiva fórmula, a través de la cual se pueden determinar la altura de distintos segmentos verticales bajo la curva al asignarles un determinado ancho, tal y como se observa en la Figura 77.

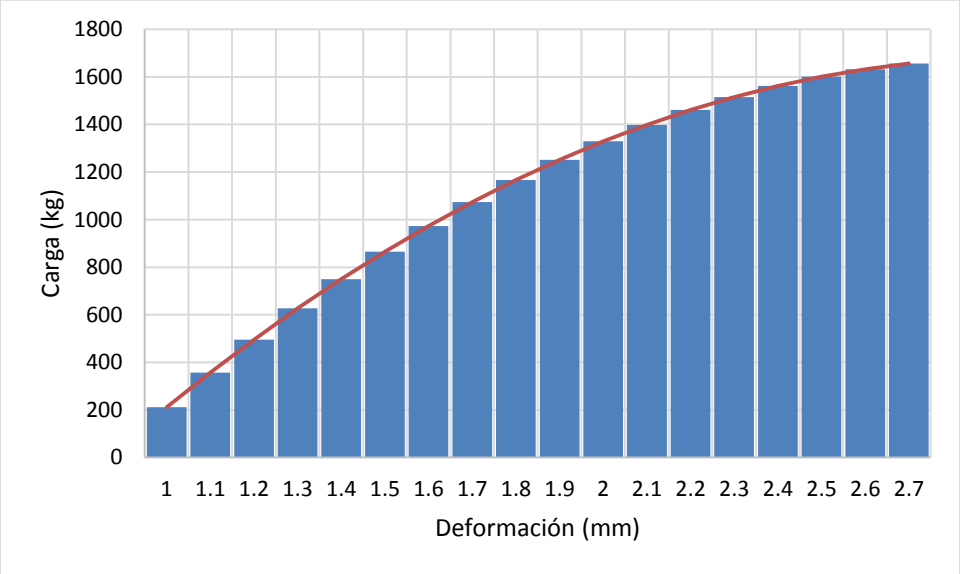


Figura 77 – Cálculo de trabajo de fracturación

Una vez determinada el área de cada elemento rectangular, se realiza una sumatoria y se obtiene un valor aproximado del área bajo la curva, el cual está dado en unidades de kg x mm. Se debe tener en cuenta que con el fin de unificar el criterio de evaluación del desempeño de las mezclas, únicamente se tuvo en cuenta el trabajo requerido para llegar al fallo, es decir que, a partir de este momento no se

calculó más área bajo la curva. En la Tabla 58 se presentan los resultados obtenidos para cada tipo de mezcla:

Tabla 58 – Trabajo de fractura

Tipo de mezcla	**Trabajo (kg x mm)**	**Carga Máxima (kg)**	**% de trabajo**	**% de carga**
MC	1992	1656	-	-
MT	1437	1537	72%	93%
MT40	1160	1742	58%	105%
MT50	1553	1923	78%	116%
MT60	1737	1959	87%	118%
MT50-135	958	1524	48%	92%
MT60-135	858	1624	43%	98%

Los valores presentados en las columnas denominadas «% de trabajo» y «% de carga» se obtienen al comparar los resultados obtenidos por la mezcla de control con los resultados de las demás mezclas.

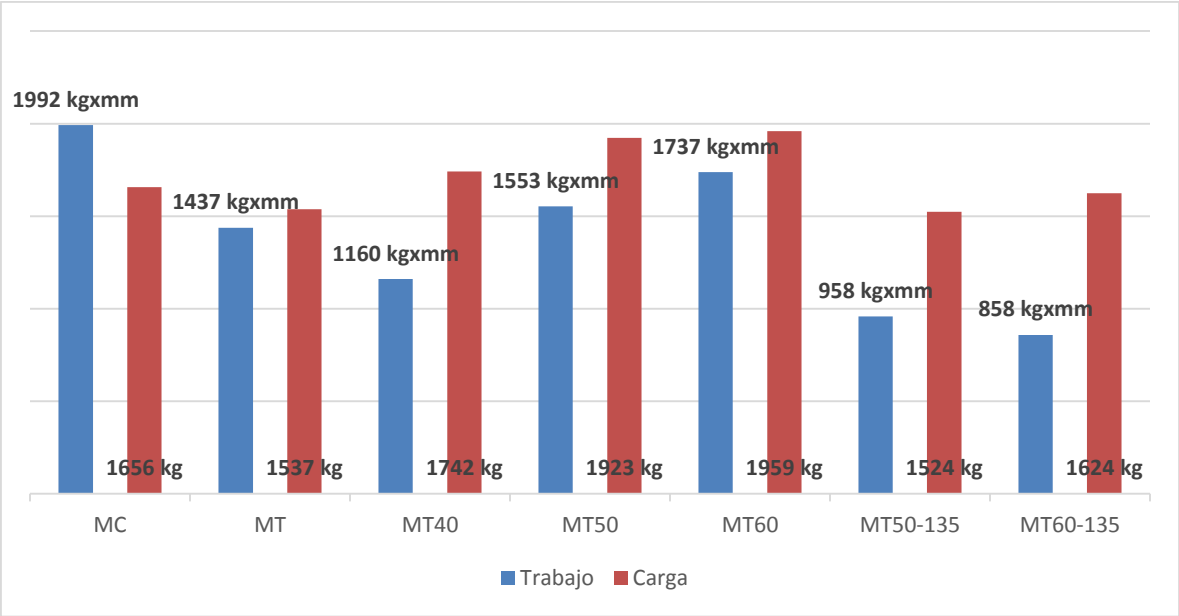


Figura 78 – Comparativa entre trabajo de fracturación y carga máxima soportada

A partir de los datos plasmados en la Figura 78, se puede apreciar que si bien las mezclas tibias con espumado y RAP fabricadas a 140°C soportaron mayores cargas, la mezcla caliente de control requirió una mayor cantidad de trabajo para su fracturación. De forma complementaria se observó que la mezcla tibia con espumado y sin RAP soportó menores cargas que las mezclas con RAP fabricadas a 140°C, sin embargo, superó en cantidad de trabajo requerido para el fallo a la mezcla que incluyó un 40% de RAP. En cuanto a las mezclas tibias con espumado y RAP fabricadas a 135°C, sus cargas máximas soportadas presentaron valores cercanos a los de la mezcla tibia sin RAP, sin embargo el trabajo necesario para su fractura fue inferior al de esta mezcla. Según Wu et al. (2019), esta cantidad de trabajo de fractura puede relacionarse con la resistencia a la fatiga de las mezclas evaluadas, siendo el trabajo de fractura directamente proporcional a la resistencia a la fatiga. Esto significa que la mezcla de control es la más resistente a la fatiga, dejando en último lugar a la mezcla tibia con espumado y 60% de RAP compactada a 135°C. Esto puede deberse a que la temperatura de mezcla no fue suficiente para que se cumpliera con la teoría de «roca negra» descrita por Ding et al., (2016), además de la alta concentración de RAP de la mezcla, puesto que se puede apreciar

como la mezcla tibia con espumado y elaborada a 135°C pero con un 50% de RAP soportó una mayor cantidad de trabajo de fractura. En la Figura 79 se presentan las curvas de carga vs deformación de las mezclas analizadas, por otro lado, en los Anexos del numeral 7.7 se presentan los datos arrojados por el equipo «Versa» al momento de realizar el ensayo de tensión indirecta.

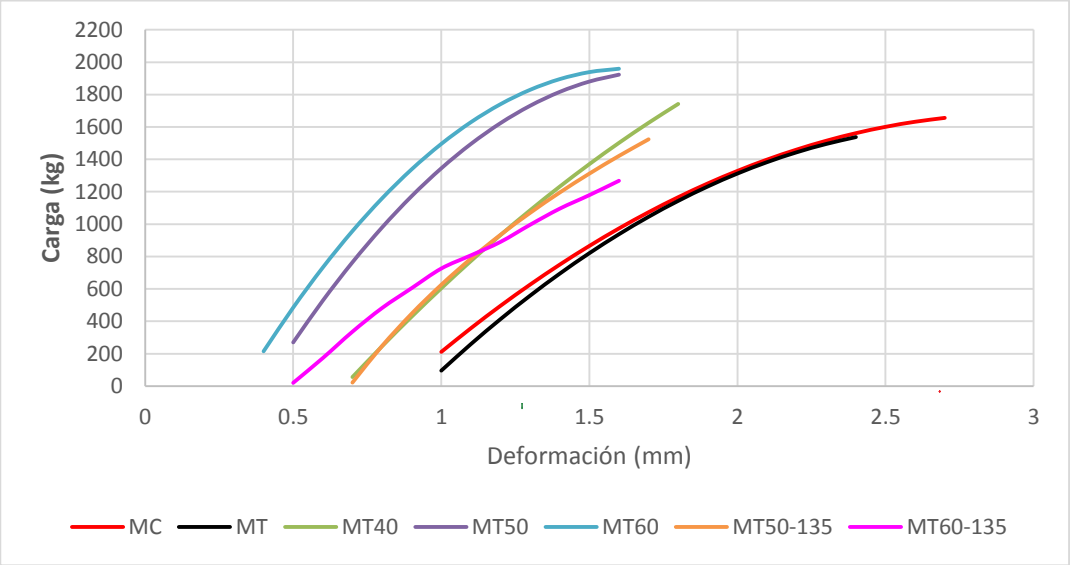


Figura 79 – Curvas de –carga vs deformación

Al relacionar los trabajos de fractura obtenidos con la resistencia a la fatiga, se encuentra que el comportamiento presentado por las mezclas elaboradas coincide con los datos presentados por Farooq & Mir (2017), Dong et al., (2017) y Kim et al. (2018), es decir, a mayor cantidad de RAP las mezclas tibias se rigidizan, soportando menores deformaciones antes de fallar

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

5.1.1. Aspectos generales de las mezclas tibias con RAP

Según la revisión bibliográfica realizada, las mezclas tibias con espumado presentan ventajas en la inclusión de RAP frente a las mezclas calientes u otras técnicas de elaboración de mezclas tibias, tal y como lo señalaron Buss et al. (2015), Farooq & Mir (2017) y Kusam et al. (2017). Esto se debe a que permiten una mejor mezcla entre el asfalto virgen y el aportado por el RAP, como lo comprobaron Ding et al., (2016), así como un mejor desempeño frente a las mezclas calientes con similares contenidos de RAP.

5.1.2. Definición de temperaturas de compactación

La selección de la temperatura de calentamiento de los agregados se basó en el parámetro «N92», el cual presentó un comportamiento inverso a la temperatura de los agregados, es decir, a mayor temperatura de los agregados, se requirió una menor cantidad de giros para alcanzar la densidad objetivo, lo cual significa que se obtuvo una mejor compactabilidad. Este comportamiento se dio en todas las mezclas, independientemente de su contenido de RAP, sin embargo, la compactabilidad de las mezclas sí se vio reducida en la medida en que se añadieron mayores cantidades de material reciclado.

La mezcla MC, requirió la menor cantidad de giros en el SGC para llegar a la densidad definida. Las mezclas tibias con RAP mejoraron su compactabilidad entre un 38% para la mezcla MT40 a un 32% para las mezclas MT50 y MT60 al aumentar la temperatura de los agregados de 100 a 140°C. Esto implica que la mezcla MC presenta una compactabilidad de entre el 16% y el 35% mejor en comparación con las mezclas MT40 y MT60 respectivamente.

En cuanto al cubrimiento de agregados, la temperatura y contenido de RAP no presentaron un impacto considerable en los resultados obtenidos.

5.1.3. Resistencia a la tensión indirecta

Durante la evaluación de la resistencia a la tensión indirecta, se observó que el desempeñó más desfavorable fue el presentado por la mezcla MT. Sin embargo, en la medida en que se aumentaba la cantidad de RAP en las mezclas tibias, esta resistencia mejoró en un 31% al agregarle un 60% de RAP (paso de 1239.3 kPa para la mezcla MT a 1799.5 kPa para la mezcla MT60) al evaluar esta resistencia en condición seca y un 51% al evaluarla en condición húmeda (paso de 783.9 kPa para la mezcla MT a 1609.2 kPa para la mezcla MT60). Por otro lado, la inclusión de RAP también significó una menor susceptibilidad a la humedad, pasando de un TSR del 63% para la mezcla MT a un 89% para la mezcla MT60.

Comparando el desempeño de las mezclas tibias con la mezcla tradicional se debe tener en cuenta que la mezcla MT40 presentó resistencias y susceptibilidad a la humedad similares a las de la mezcla MC (1450.9 kPa en condición seca para la mezcla MT40 y 1453.1 para la mezcla MC, 80% de resistencia conservada para la mezcla MT40 y 82% para la mezcla MC). Así mismo, las mezclas MT50 y MT60 superaron las resistencias e incluso presentaron menor susceptibilidad a la humedad en comparación con la mezcla MC (89% de resistencia conservada para la mezcla MT60, 87% para la mezcla MT50 y 82% para la mezcla MC).

En concordancia con los desempeños encontrados para las mezclas tibias fabricadas a 140°C, al reducir la temperatura de fabricación a 135°C e incluir concentraciones de 50% y 60% de RAP, el desempeño de las mezclas MT50-135 y MT60-135 fue ligeramente inferior al de la mezcla MT al evaluar las resistencias a la tensión indirecta en condición seca y húmeda (1435.5 kPa en condición seca para la mezcla MT50-135, 1428.8 kPa para la mezcla MT50-135 y 1450.9 kPa para la mezcla MT40. 1123 kPa para la mezcla MT60-135, 1009.2 para la mezcla MT50-135 y 1162.9 para la mezcla MT40). A pesar de esto, se debe tener en cuenta que su susceptibilidad a la humedad fue superior a la aceptable según la normativa INVIAS, puesto que su resistencia conservada fue de 71% para la mezcla MT-50-135 y 79% para la mezcla MT60-135.

5.1.4. Trabajo de fractura

Durante el desarrollo del análisis de las curvas carga vs deformación, se encontró que la mezcla MC requirió una mayor cantidad de trabajo para llegar al fallo (1992 kgxmm), ninguna de las mezclas tibias con espumado logró obtener una resistencia semejante (1737 kgxmm de la mezcla MT60, 1553 kgxmm de la mezcla MT50 y 1160 kgxmm de la mezcla MT40). A pesar de esto, la inclusión de RAP en las mezclas tibias con espumado contribuyó a aumentar la cantidad de trabajo necesario para producir el fallo, puesto que la mezcla MT-60 fue la que más se aproximó al valor de trabajo soportado por la mezcla MC, logrando alcanzar un 87% del mismo.

Es importante recalcar que las mezclas tibias con RAP y fabricadas a 140°C soportaron mayores cargas que la mezcla MC (1959 kg la mezcla MT60, 1923 kg la mezcla MT50 y 1742 kg la mezcla MT40), sin embargo, su comportamiento fue el de un material más rígido, razón por la cual soportaron una menor cantidad de trabajo antes del fallo. La mezcla MT fue inferior a la mezcla MC en los dos parámetros mencionados (carga y trabajo) – (1437 kgxmm y 1537 kg para la mezcla MT40 frente a 1992 kgxmm y 1656 kg para la mezcla MC). Las mezclas MT50-135 y MT60-135, a pesar de contar con resistencias a la carga similares a las de la mezcla MC (92% y 98% respectivamente), obtuvieron los valores más bajos de trabajo de fractura, siendo apenas del 48% para la mezcla MT50-135 y del 43% para la mezcla MT60-135 en comparación con la mezcla MC. Por lo tanto, se hace evidente que para este caso (mezclas tibias con espumado y RAP fabricadas a 135°C) la inclusión de una mayor cantidad de RAP fue contraproducente para la cantidad de trabajo que se requiere para producir el fallo en la mezcla.

Según Wu et al. (2019), la cantidad de trabajo que soporta una mezcla está relacionada con la resistencia a la fatiga, esto implicaría que ninguna de las mezclas tibias evaluadas presentaría una mayor resistencia a la fatiga que la MC en campo, lo cual es concordante con lo señalado por Farooq & Mir (2017), Dong et al., (2017) y Kim et al. (2018). Se puede ver como la inclusión de RAP en las mezclas tibias fabricadas a la misma temperatura genera que en comparación con la mezcla MT,

soporten menores deformaciones antes de llegar al fallo, a pesar de esto, el hecho de ser más rígidas ayudó a que el valor de trabajo aumentara.

5.1.5. Conclusiones generales

Los resultados obtenidos por las mezclas tibias con RAP indican que su resistencia a la carga, a la fatiga y a la humedad pueden llegar a ser comparables con los de una mezcla caliente tradicional. Sin embargo, es importante señalar que existe la posibilidad de obtener menores resistencias a la fatiga, lo cual puede implicar un aumento en la frecuencia de mantenimiento. A pesar de esto, sus ventajas tanto económicas como medioambientales, podrían llegar a superar con creces este aumento en los costos de mantenimiento, puesto que la utilización de concentraciones altas de RAP (mayores a 40%) significan la reducción de costos de elaboración de mezclas asfálticas y de la disposición final del RAP en los casos en los que este no es reutilizado.

Por lo tanto, considerando las ventajas económicas y medioambientales, así como el comportamiento presentado por las mezclas MT40, MT50 y MT60 frente a la mezcla MC, se considera viable su utilización en campo.

Para el caso particular de las mezclas analizadas en la presente investigación, es importante señalar que la temperatura óptima de fabricación consistió en utilizar el asfalto a 150°C y los agregados (incluyendo el RAP) a 140°C, lo cual se traduce en la reducción de 20°C en comparación con la mezcla caliente de control, lo que redunda en ventajas a nivel medioambiental tales como la reducción del consumo de combustible durante la fabricación de estas mezclas (1 a 2 litros por tonelada de mezcla) y en la cantidad de CO_2 liberado a la atmósfera (2 a 7 kg por tonelada de mezcla) Dinis-Almeida & Afonso (2015).

Por otro lado, es importante señalar que la utilización de concentraciones de RAP comprendidas entre el 40 y el 60% se traducen en el ahorro de entre 15 a 30 dólares por tonelada de mezcla asfáltica fabricada Zaumanis et al.(2016).

5.2. Recomendaciones

Es importante tener en cuenta la recomendación dada por Xiao et al. (2015) frente a la necesidad de que las entidades encargadas de las normativas para la fabricación de mezclas asfálticas establezcan un procedimiento de caracterización de RAP que permita conocer las características determinantes de este material para cada una de las fuentes y condiciones particulares de cada proyecto para promover un mayor aprovechamiento de este material.

Es necesario continuar con la investigación en este tipo de mezclas, realizando estudios donde se incluyan otro tipo de ensayos que permitan establecer el desempeño de estas mezclas a largo plazo y en condiciones de servicio. Para este estudio en particular, por motivos de la disponibilidad de equipos en laboratorio, no fue posible realizar los ensayos de Módulo resiliente, los cuales en conjunto con ensayos de fatiga y ahuellamiento podrían contribuir a determinar el uso de mezclas tibias con espumado y concentraciones de RAP superiores al 40% en campo.

Se recomienda contemplar un ajuste en el numeral 462.2.2 «Material bituminoso» del artículo 462 «Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente» del capítulo 4 «Pavimentos asfálticos» de la normativa INVIAS, puesto que no se contempla la necesidad de mezclar el asfalto virgen con el asfalto proveniente del RAP, el cual aportará una gran rigidez dificultando las actividades de compactación de las mezclas asfálticas, tal y como se pudo apreciar en los resultados presentados en el numeral 3.6.1.1. Se sugiere que para la fabricación de mezclas con RAP, se utilice un asfalto más blando que el requerido por la especificación particular del proyecto, lo cual debe estar en función de la rigidez y la cantidad del asfalto aportado por el RAP.

6. Referencias

- Abreu, L., Oliveira, J., Silva, H., Silva, C., Palha, D., & Fonseca, P. (2017). Foamed bitumen: An alternative way of producing asphalt mixtures. Ciência & Tecnologia Dos Materiais, 29(1), e198-e203. https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.07.004
- Abreu, L. P. F., Oliveira, J. R. M., Silva, H. M. R. D., Palha, D., & Fonseca, P. V. (2017). Suitability of different foamed bitumens for warm mix asphalts with increasing recycling rates. Construction and Building Materials, 142, 342-353. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.085
- Braham, A., Lynn, T., Steger, R., & Pyle, R. (2015). Characterizing Compactability of High RAP and Warm Mix Asphalt Mixtures in the Superpave Gyratory Compactor. Journal of Testing and Evaluation, 43(3), 20130319. https://doi.org/10.1520/JTE20130319
- Burgos, P. A. A. (s. f.). Diagnóstico sobre el empleo de material asfáltico reciclado (RAP) en Bogotá. 63.
- Buss, A., Williams, R. C., & Schram, S. (2015). The influence of warm mix asphalt on binders in mixes that contain recycled asphalt materials. Construction and Building Materials, 77, 50-58. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.023
- Capitão, S. D., Picado-Santos, L. G., & Martinho, F. (2012). Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt. Construction and Building Materials, 36, 1016-1024. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038
- Daoudi, A., Dony, A., Ziyani, L., Picard, N., & Buisson, J. (2019). How to Evaluate with Relevance the Compactability of Warm Mixes Using the Gyratory Compactor (GC)? En L. D. Poulikakos, A. Cannone Falchetto, M. P. Wistuba, B. Hofko, L. Porot, & H. Di Benedetto (Eds.), RILEM 252-CMB Symposium (Vol. 20, pp. 263-268). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00476-7_41
- Ding, Y., Huang, B., & Shu, X. (2016). Characterizing blending efficiency of plant produced asphalt paving mixtures containing high RAP. Construction and

Building Materials, 126, 172-178. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.025

- Dinis-Almeida, M., & Afonso, M. L. (2015). Warm Mix Recycled Asphalt – a sustainable solution. Journal of Cleaner Production, 107, 310-316. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.065
- Dong, F., Yu, X., Xu, B., & Wang, T. (2017). Comparison of high temperature performance and microstructure for foamed WMA and HMA with RAP binder. Construction and Building Materials, 134, 594-601. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.106
- Farooq, M. A., & Mir, M. S. (2017). Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) in warm mix asphalt (WMA) pavements: A review. Innovative Infrastructure Solutions, 2(1). https://doi.org/10.1007/s41062-017-0058-7
- Harman, T., D'Angelo, J., & Bukowski, J. (s. f.). Superpave Asphalt Mixture Design Workshop. 78.
- Kim, M., Mohammad, L. N., Jordan, T., & Cooper, S. B. (2018). Fatigue performance of asphalt mixture containing recycled materials and warm-mix technologies under accelerated loading and four point bending beam test. Journal of Cleaner Production, 192, 656-664. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.070
- Kusam, A., Malladi, H., Tayebali, A. A., & Khosla, N. P. (2017). Laboratory Evaluation of Workability and Moisture Susceptibility of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Recycled Asphalt Pavements. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(5), 04016276. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001825
- Lyubarskaya, M. A., Merkusheva, V. S., Osian, P. A., Ilin, A. A., & Svintsov, E. S. (2017). Integrated Approach to Using Technology of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). Procedia Engineering, 189, 860-866. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.134
- Mazumder, M., Sriraman, V., Kim, H. H., & Lee, S.-J. (2016). Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA). International Journal of Pavement Research and Technology, 9(3), 190-201. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001

- Mogawer, W. S., Stuart, K., Austerman, A. J., & Soliman, A. A. (2018). Investigating the Performances of Plant-Produced High-Reclaimed Asphalt Pavement Content Warm Mix Asphalts. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2672(28), 130-142. https://doi.org/10.1177/0361198118786828
- Nicuță, A. M., Andrei, R., & Budescu, M. (2013). Comparative Assessment on the Ecologic and Economic Impact of New Road Technologies Integrating Reclaimed Asphalt Pavement. Advanced Engineering Forum, 8-9, 147-156. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.8-9.147
- Noferini, L., Simone, A., Sangiorgi, C., & Mazzotta, F. (2017). Investigation on performances of asphalt mixtures made with Reclaimed Asphalt Pavement: Effects of interaction between virgin and RAP bitumen. International Journal of Pavement Research and Technology, 10(4), 322-332. https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.03.011
- Reyes Ortiz, O. J. (2018). Estudiar la respuesta mecánica y dinámica de mezclas asfálticas fabricadas con pavimento reciclado (RAP). Universidad Militar Nueva Granada.
- Rondón, H. A., Urazán, C. F., & Chávez, S. B. (2015). Characterization of a Warm Mix Asphalt Containing Reclaimed Asphalt Pavements. Airfield and Highway Pavements 2015, 19-30. https://doi.org/10.1061/9780784479216.003
- Rubio, M. C., Martínez, G., Baena, L., & Moreno, F. (2012). Warm mix asphalt: An overview. Journal of Cleaner Production, 24, 76-84. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053
- Sunarjono, S., & Hidayati, N. (2018). Mixture design consideration for foamed asphalt using RAP materials. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 403, 012027. https://doi.org/10.1088/1757-899X/403/1/012027
- Taher, M. N. M., & Aman, M. Y. (2016). AN OVERVIEW OF RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT (RAP) MATERIALS IN WARM MIX ASPHALT USING FOAMING TECHNOLOGY. 11(16), 8.
- Wen, Y., Guo, N., You, Z., Wang, L., & Tan, Y. (2018). Comparative evaluation of rheological properties and micromechanics of non-foamed and foamed asphalt mastic. Construction and Building Materials, 193, 654-664. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.035

- Wu, S., Wen, H., Zhang, W., Shen, S., Mohammad, L. N., Faheem, A., & Muhunthan, B. (2019). Field performance of top-down fatigue cracking for warm mix asphalt pavements. International Journal of Pavement Engineering, 20(1), 33-43. https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1248204
- Xiao, F., Putman, B., & Amirkhanian, S. (2015). Rheological characteristics investigation of high percentage RAP binders with WMA technology at various aging states. Construction and Building Materials, 98, 315-324. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.114
- Xie, Z., Tran, N., Taylor, A., Julian, G., West, R., & Welch, J. (2017). Evaluation of foamed warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement: Field and laboratory experiments. Road Materials and Pavement Design, 18(sup4), 328-352. https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1389077
- Xu, S., Xiao, F., Amirkhanian, S., & Singh, D. (2017). Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies – A review. Construction and Building Materials, 142, 148-161. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069
- Yang, S.-H., Rachman, F., & Susanto, H. A. (2018). Effect of moisture in aggregate on adhesive properties of warm-mix asphalt. Construction and Building Materials, 190, 1295-1307. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.208
- Yin, F., Arambula, E., Newcomb, D., & Bhasin, A. (2014). Workability and coatability of foamed Warm-Mix Asphalt. En Y. Kim, Asphalt Pavements (pp. 721-730). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b17219-90
- Yu, X., Wang, Y., & Luo, Y. (2013). Impacts of water content on rheological properties and performance-related behaviors of foamed warm-mix asphalt. Construction and Building Materials, 48, 203-209. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.018
- Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2016). 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits. Transportation Research Procedia, 14, 3493-3502. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.315
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Jia, X., & Woods, M. (2012). Laboratory Performance Evaluation of Warm-Mix Asphalt Containing High Percentages of Reclaimed Asphalt Pavement. Transportation Research Record: Journal of the

Transportation Research Board, 2294(1), 98-105. https://doi.org/10.3141/2294-11

- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Moore, J., & Bowers, B. (2016). Effects of WMA Technologies on Asphalt Binder Blending. Journal of Materials in Civil Engineering, 28(2), 04015106. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001381
- Zhao, S., Huang, B., Shu, X., & Woods, M. (2013). Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. Construction and Building Materials, 44, 92-100. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.010

7. Anexos

7.1. Caracterización del asfalto virgen

Penetración

Tabla 59 - Penetración - Asfalto virgen

FECHA: 27/09/2019	
NORMA INV-E-706-13	
Medida	**Penetración (0.1mm)**
1	64
2	66
3	64
Promedio	**65**

Punto de ablandamiento

Tabla 60 - Punto de ablandamiento - Asfalto virgen

FECHA: 27/09/2019	
NORMA INV-E-712-13	
Muestra	**Temperatura (°C)**
1	48.2
2	49
Promedio	**48.6**

Viscosidad

Tabla 61 - Viscosidad - Asfalto virgen

FECHA: 27/09/2019				
NORMA INV-E-717-13				
Temperatura °C	**Torque (%)**	**RPM**	**Viscosidad (cP)**	**Viscosidad Pa-s**
60	77	0.8	240625	241
120	82	250	818	0.818
130	38	200	475	0.475
140	28	250	276	0.276
150	18	250	175	0.175
160	12	250	117	0.117

7.2. Caracterización de la espuma de asfalto

Temperatura: 140°C

Tabla 62 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 140°C

Contenido de agua	Altura máxima (cm)	Expansión	Vida media (s)
1%	4	3.3	43.75
2%	12	10.0	14.1
3%	18	15.0	12.82
4%	19	15.8	12.01

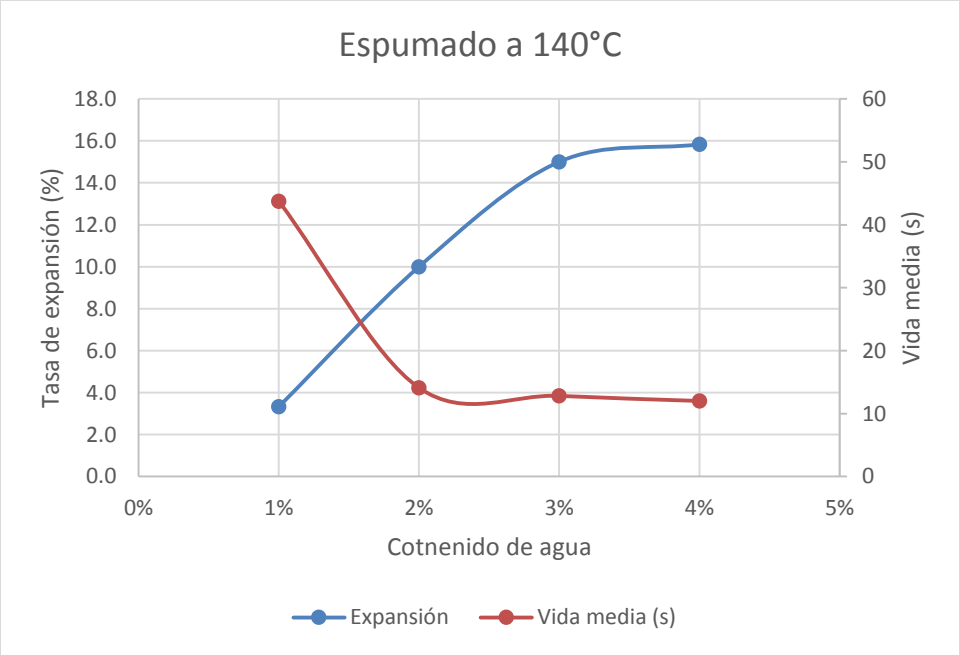


Figura 80 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 140°C

Temperatura: 150°C

Tabla 63 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 150°C

Contenido de agua	Altura máxima (cm)	Expansión	Vida media (s)
1%	4	3.3	48.4
2%	8	6.7	20.33
3%	14	11.7	11.88
4%	18	15.0	9.75

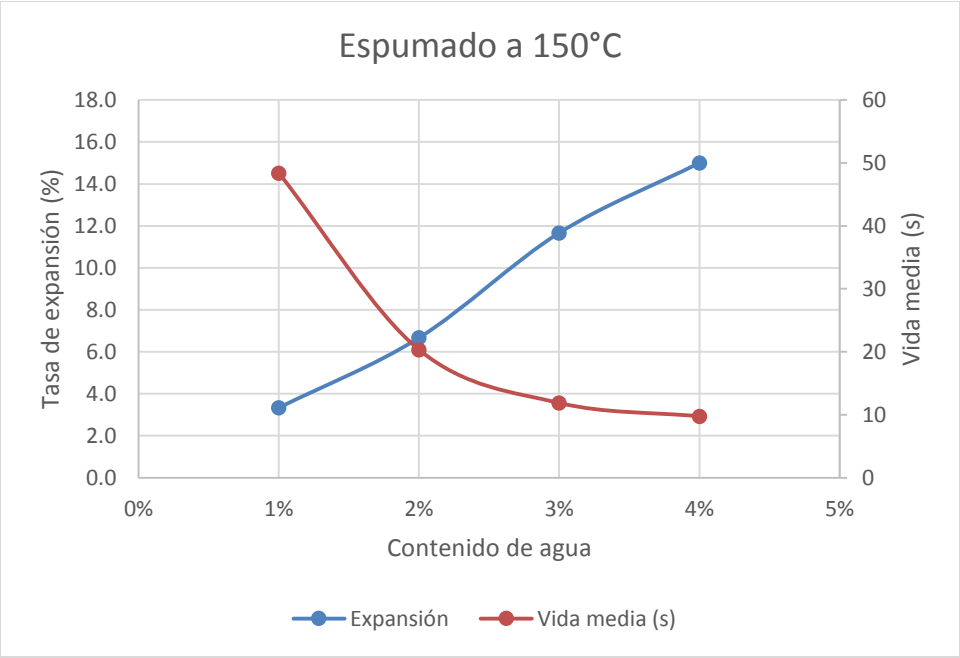


Figura 81 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 150°C

Temperatura: 160°C

Tabla 64 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 160°C

Contenido de agua	Altura máxima (cm)	Expansión	Vida media (s)
1%	4	3.3	39.06

Contenido de agua	Altura máxima (cm)	Expansión	Vida media (s)
2%	6	5.0	24.97
3%	9	7.5	17.34
4%	10	8.3	15.37

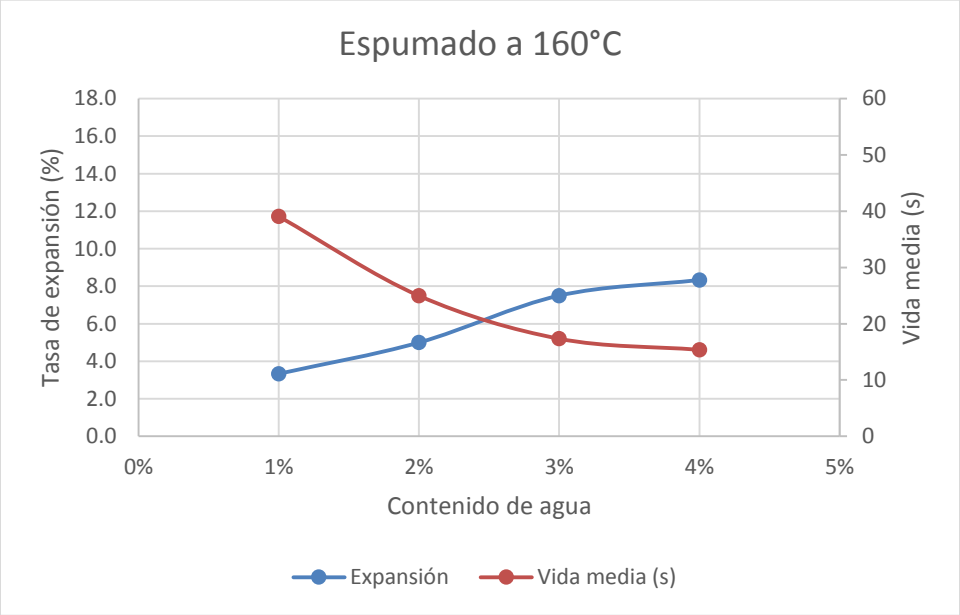


Figura 82 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 160°C

Temperatura: 170°C

Tabla 65 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 170°C

Contenido de agua	Altura máxima (cm)	Expansión	Vida media (s)
1%	3	2.5	52.64
2%	5.5	4.6	27.54
3%	6	5.0	27.26
4%	8	6.7	21.67

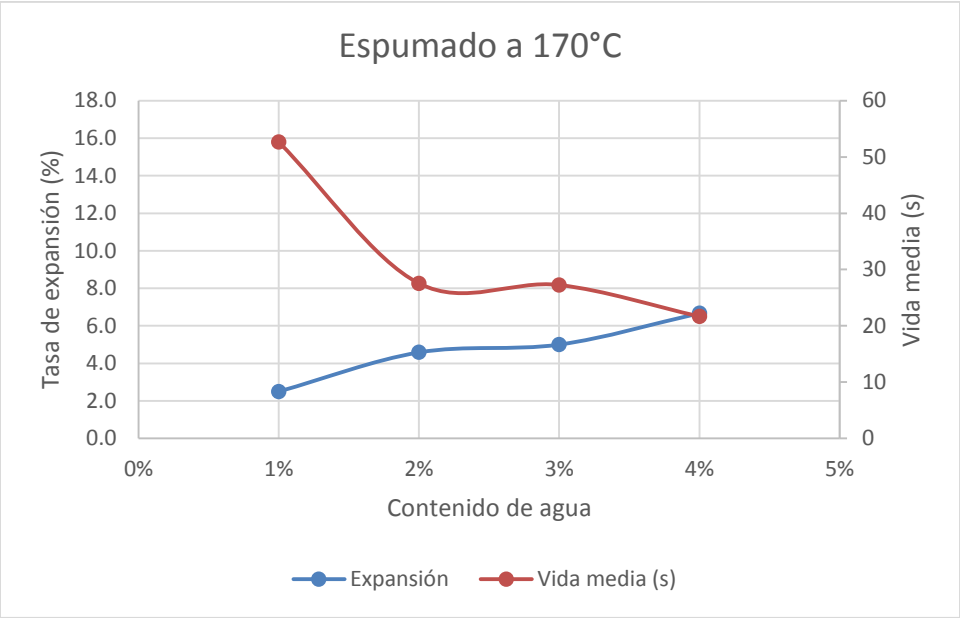


Figura 83 - Tasa de expansión y vida media de la espuma de asfalto a 170°C

7.3. Caracterización de agregados vírgenes

Desgaste en máquina de los ángeles

Tabla 66 - Desgaste en máquina de «Los Ángeles» - Agregados con tamaño máximo nominal de 1"

FECHA: 12/06/2020			
NORMA INV-E-2018-13			
Máximo nominal 1"			
Masa de la muestra seca antes del ensayo (g)		5005	**% de pérdidas**
Masa de la muestra retenida tamiz No. 12	100 Revoluciones	171.9	3%
	500 revoluciones	860	17%
Control 100rev/500rev		0.200	

Tabla 67 - Desgaste en máquina de «Los Ángeles» - Agregados con tamaño máximo nominal de 3/4"

FECHA: 12/06/2020			
NORMA INV-E-2018-13			
Máximo nominal 3/4"			
Masa de la muestra seca antes del ensayo (g)		4996	**% de pérdidas**
Masa de la muestra retenida tamiz No. 12	100 Revoluciones	200	4%
	500 revoluciones	1029	21%
Control 100rev/500rev		0.194	

7.4. Caracterización del RAP

7.4.1. Caracterización del asfalto del RAP

Penetración

Tabla 68 - Penetración - Asfalto recuperado

FECHA: 27/09/2019	
NORMA INV-E-706-13	
Medida	**Penetración (0.1mm)**
1	23
2	22
3	24
Promedio	**23**

Punto de ablandamiento

Tabla 69 - Punto de ablandamiento - Asfalto recuperado

FECHA: 27/09/2019	
NORMA INV-E-712-13	
Muestra	**Temperatura (°C)**
1	76.4
2	77.2
Promedio	**76.8**

Viscosidad

Tabla 70 - Viscosidad - Asfalto recuperado

FECHA: 27/09/2019				
NORMA INV-E-717-13				
Temperatura °C	**Torque (%)**	**RPM**	**Viscosidad (cP)**	**Viscosidad Pa-s**
100	61	0.7	21514	21.514
120	42	5	20950	20.95
140	67	50	3365	3.365
160	61	170	904.9	0.9049

7.4.2. Determinación del contenido de asfalto en el RAP

Tabla 71 - Contenido de asfalto del RAP

Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa del recipiente + muestra húmeda (g)	Masa del recipiente + muestra seca (g)	Masa de la muestra + recipiente después de la extracción (g)	Masa inicial del filtro (g)	Masa final del filtro (g)	m1 (g)	m2 (g)	m3 (g)	m4 (g)	Porcentaje de asfalto
1	108.5	1361.5	1338.1	1262.2	14.13	15.69	1253	23.4	75.9	1.56	6.3%
2	108.9	1361.2	1336.2	1261.6	14.06	15.57	1252.3	25	74.6	1.51	6.2%
3	104.3	1356.2	1333.6	1254.2	14.09	16	1251.9	22.6	79.4	1.91	6.6%
										Promedio	**6.5%**

7.4.3. Caracterización de los agregados del RAP

Granulometría del RAP

Tabla 72 – Control de masa tamizada - RAP

Muestra original seca (g)	5752.1
Muestra seca después de lavada (g)	5631.4
Masa de recipiente (g)	356
% TM 200	2%

Tabla 73 – Distribución de porcentajes por tamiz - RAP

				Requerido MDC-19		
Tamiz	**Peso retenido (g)**	**% retenido**	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
3/4"	90.5	2%	98%	100%	100%	Fuera de rango
1/2"	535.5	12%	88%	95%	80%	Cumple
3/8"	436.4	20%	80%	88%	70%	Cumple
No. 4	1330.6	45%	55%	65%	49%	Cumple
No 10	1379.8	72%	28%	45%	29%	Fuera de rango
No. 40	1402.1	98%	2%	25%	14%	Fuera de rango
No. 80	83.4	100%	0%	17%	8%	Fuera de rango
No. 200	10.1	100%	2%	8%	4%	Fuera de rango

Granulometría de los agregados del RAP

Tabla 74 – Control de masa tamizada – Agregados del RAP

Muestra original seca (g)	2350.2
Muestra seca después de lavada (g)	2171.7
Masa de recipiente (g)	106.3
% TM 200	8%

Tabla 75 –Distribución de porcentajes por tamiz – Agregados del RAP

				Requerido MDC-19		
Tamiz	**Peso retenido (g)**	**% retenido**	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
3/4"	0	0%	100%	100%	100%	Cumple
1/2"	137.1	6%	94%	95%	80%	Cumple
3/8"	147.1	13%	87%	88%	70%	Cumple
No. 4	411.2	31%	69%	65%	49%	Fuera de rango
No. 10	461.4	52%	48%	45%	29%	Fuera de rango

				Requerido MDC-19		
Tamiz	**Peso retenido (g)**	**% retenido**	**% pasa**	**% pasa**		**Control**
No. 40	469.8	72%	28%	25%	14%	Fuera de rango
No. 80	244.2	83%	17%	17%	8%	Cumple
No. 200	188.4	92%	8%	8%	4%	Cumple

7.5. Comprobación de las propiedades de la mezcla asfáltica en caliente

7.5.1. Estabilidad/flujo

Tabla 76 - Resultados de estabilidad y flujo – Mezcla caliente de control con 6% de asfalto

FECHA: 05/06/2020			
NORMA INV-E-748-13			
Probetas	**Estabilidad (kg)**	**Estabilidad (N)**	**Flujo (mm)**
1	1699.527	16655	3.483
2	2487.656	24379	3.439
3	1718.958	16846	3.435
Promedio		**16751**	**3.5**

Tabla 77 - Relación estabilidad/flujo – Mezcla caliente de control con 6% de asfalto

FECHA: 05/06/2020	
NORMA INV-E-748-13	
Probetas	**Estabilidad/flujo**
1	4.78
2	7.09
3	4.90

7.5.2. Gravedades específicas de la mezcla caliente

Densidad máxima

Tabla 78 - Densidad máxima, mezcla caliente

FECHA: 15/07/2020	
NORMA INV-E-735-13	
Densidad máxima de mezcla	2.33
Masa de la muestra	1526
Masa del picnómetro + agua + tapa	11741
Masa del picnómetro + agua + muestra	12611

Tabla 79 - Densidad «bulk», mezcla caliente

FECHA: 15/07/2020	
NORMA INV-E-733-13	
Densidad Bulk	2.22
Masa seca (g)	1205.1
Masa sumergida (g)	645.6
Masa SSS (g)	1188.5

7.6. Resultados de compactabilidad

Mezcla «MC»

Tabla 80 - Número de giros para N92 - MC

No. de giros para N92	
Briqueta 1	129
Briqueta 2	132
Briqueta 3	138
Promedio	**133**

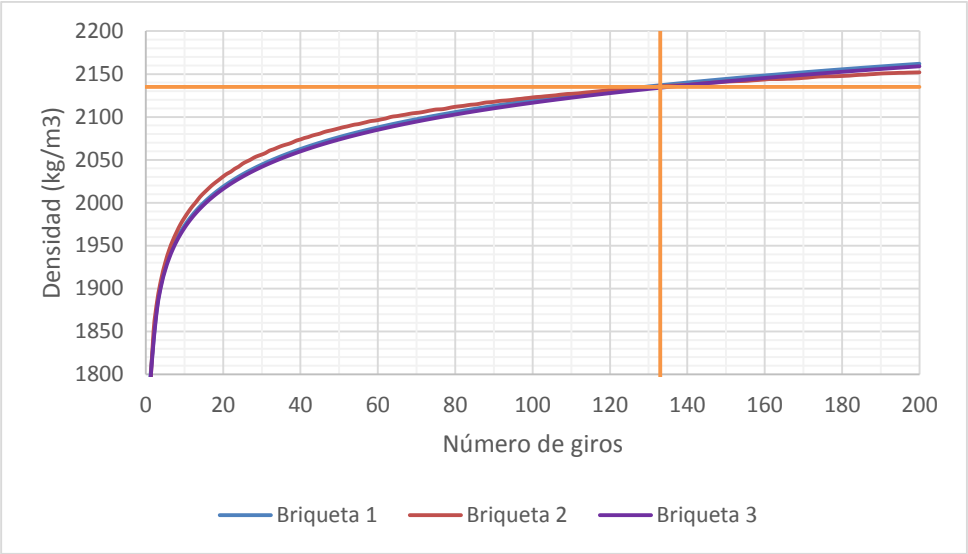


Figura 84 - Número de giros para N92 - MC

Mezcla «MT40»

Tabla 81 - Número de giros para N92 - MT40, 100°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	298
Briqueta 2	293
Briqueta 3	288
Promedio	**293**

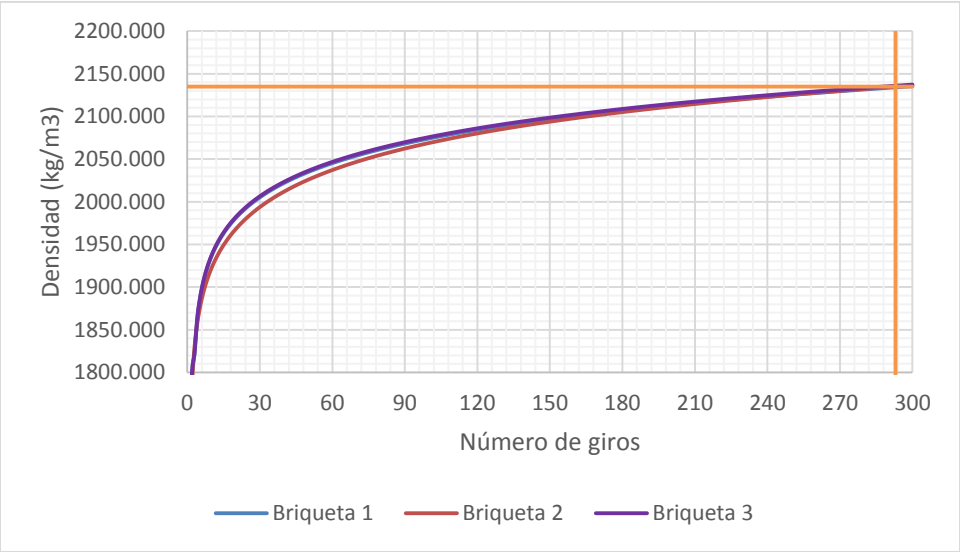


Figura 85 - Número de giros para N92 - MT40, 100°C

Tabla 82 - Número de giros para N92 - MT40, 120°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	229
Briqueta 2	238
Briqueta 3	231
Promedio	**233**

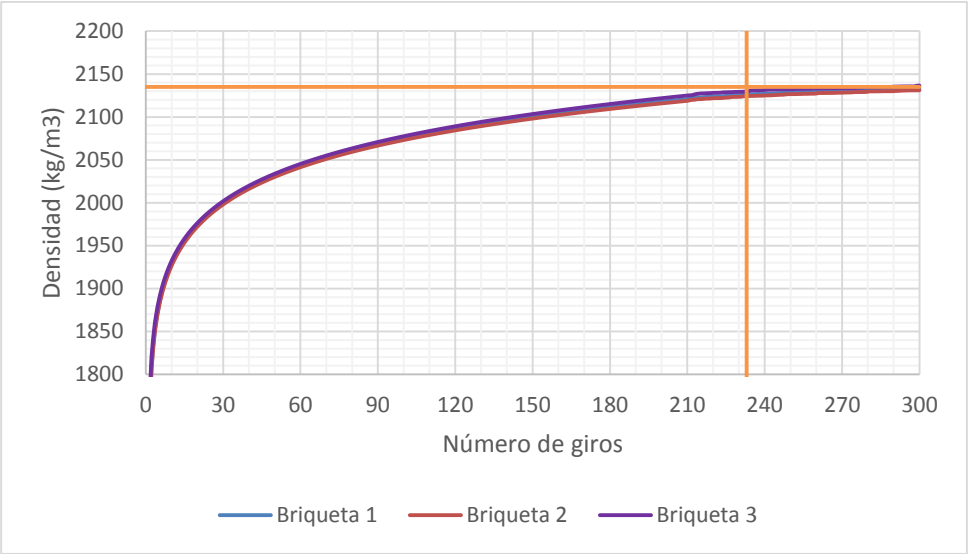


Figura 86 - Número de giros para N92 - MT40, 120°C

Tabla 83 - Número de giros para N92 - MT40, 140°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	177
Briqueta 2	184
Briqueta 3	179
Promedio	**180**

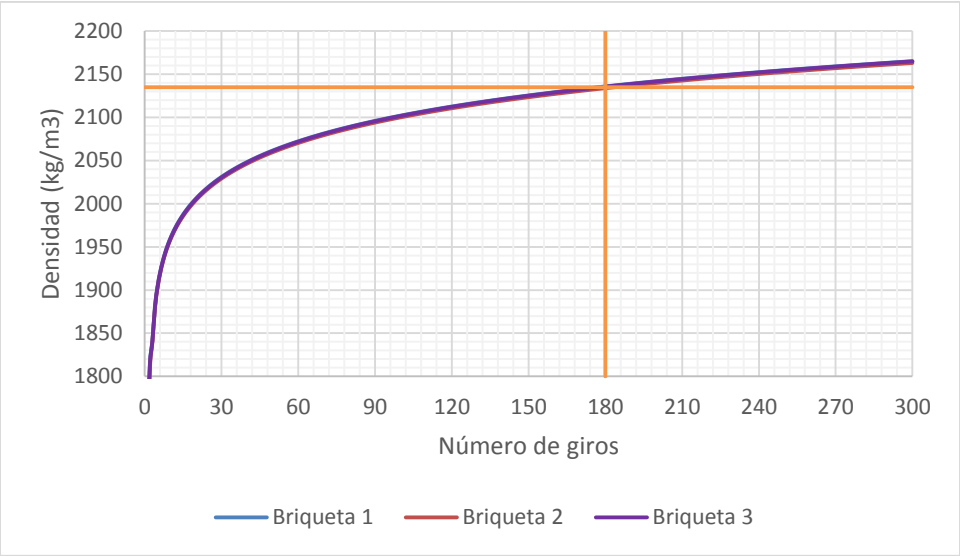


Figura 87 - Número de giros para N92 - MT40, 140°C

Mezcla «MT50»

Tabla 84 - Número de giros para N92 - MT50, 100°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	304
Briqueta 2	306
Briqueta 3	311
Promedio	**307**

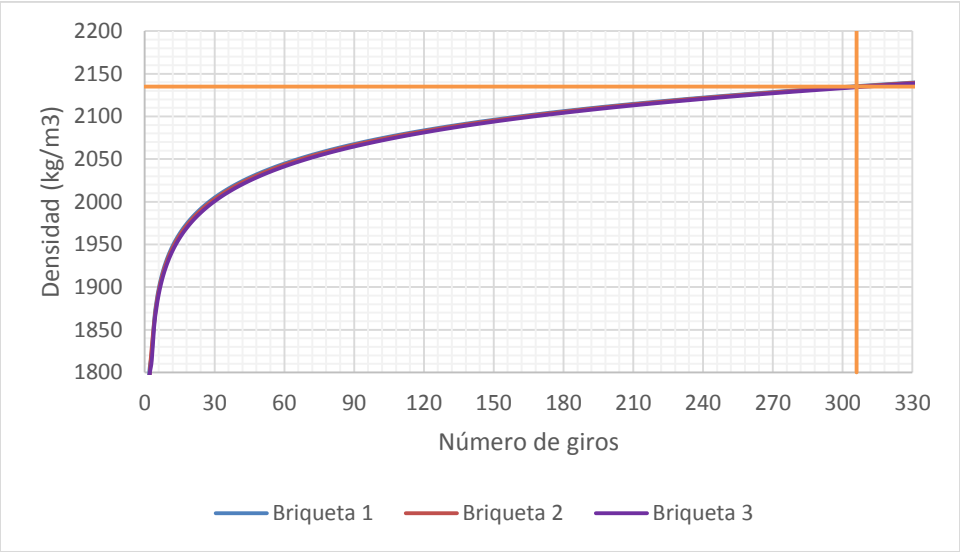


Figura 88 - Número de giros para N92 - MT50, 100°C

Tabla 85 - Número de giros para N92 - MT50, 120°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	264
Briqueta 2	256
Briqueta 3	269
Promedio	**263**

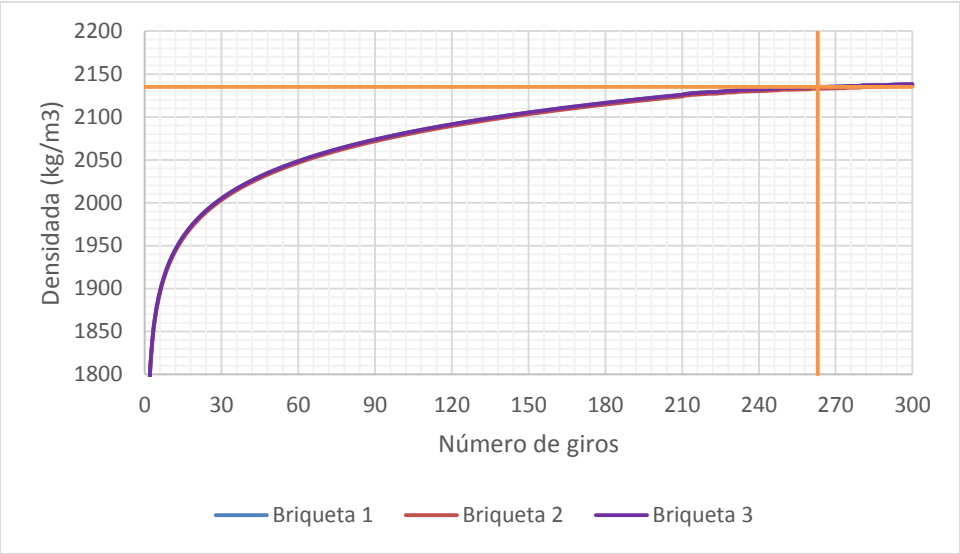


Figura 89 - Número de giros para N92 - MT50, 120°C

Tabla 86 - Número de giros para N92 - MT50, 140°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	203
Briqueta 2	209
Briqueta 3	212
Promedio	**208**

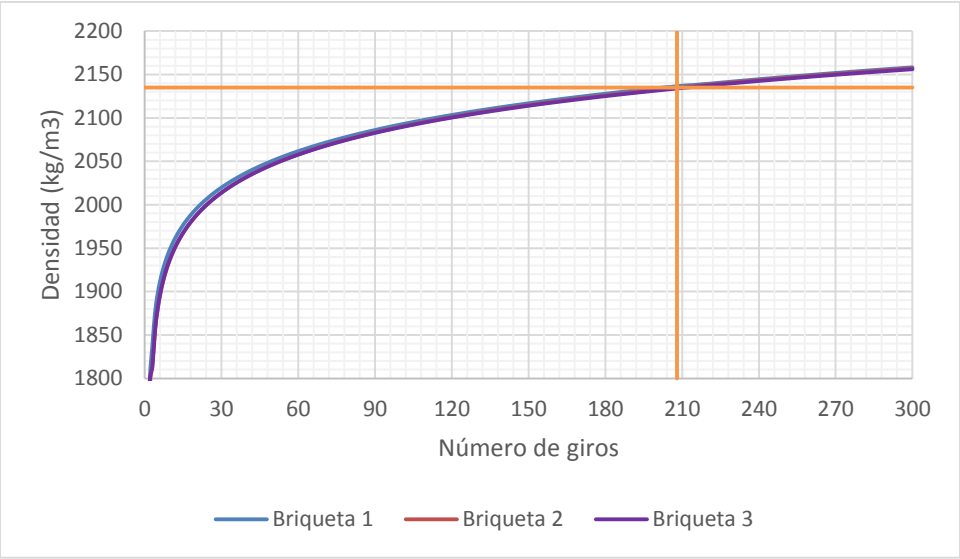


Figura 90 - Número de giros para N92 - MT50, 140°C

Mezcla «MT60»

Tabla 87 - Número de giros para N92 - MT60, 100°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	346
Briqueta 2	340
Briqueta 3	349
Promedio	**345**

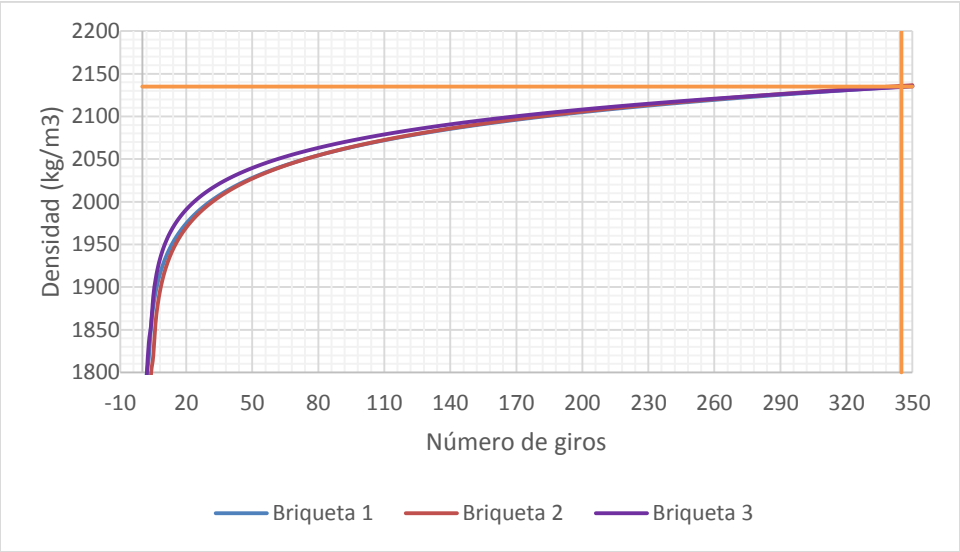


Figura 91 - Número de giros para N92 - MT60, 100°C

Tabla 88 - Número de giros para N92 - MT60, 120°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	291
Briqueta 2	289
Briqueta 3	286
Promedio	**289**

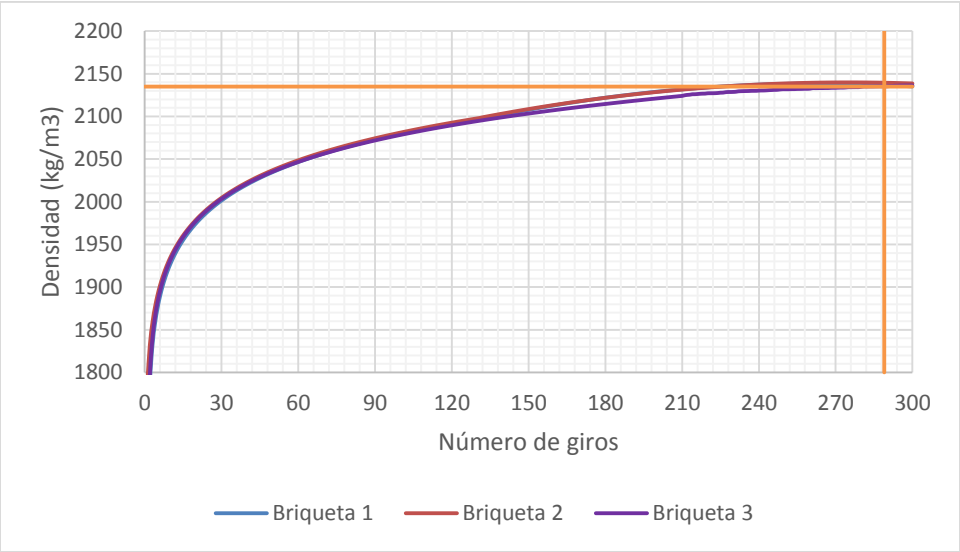


Figura 92 - Número de giros para N92 - MT60, 120°C

Tabla 89 - Número de giros para N92 - MT60, 140°C

No. de giros para N92	
Briqueta 1	232
Briqueta 2	235
Briqueta 3	227
Promedio	**231**

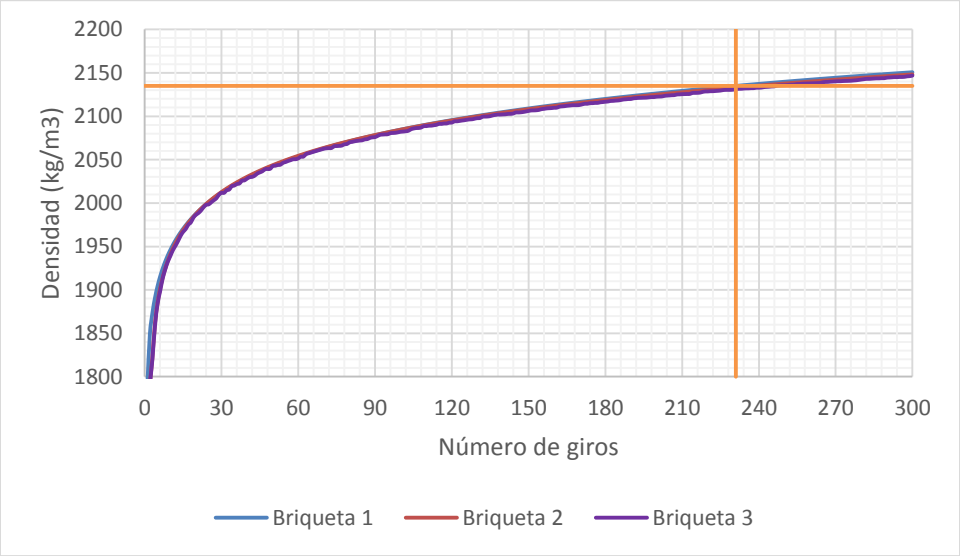


Figura 93 - Número de giros para N92 - MT60, 140°C

7.7. Resultados de resistencia a la tensión indirecta

Tabla 90 - Tensión indirecta, mezcla «MC»

Fecha de elaboración: 8 y 9 de octubre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla caliente		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	16733.0	1453.4	16695.9	1453.1
	2	17000.7	1481.1		
	3	16354.1	1424.8		
Húmeda	1	13386.4	1162.7	13706.7	1187.1
	2	14055.7	1199.4		
	3	13678.0	1199.1	**TSR**	82%

Tabla 91 - Tensión indirecta, mezcla «MT»

Fecha de elaboración: 8 y 9 de octubre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla tibia		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	14867.4	1208.7	15239.1	1239.3
	2	14124.0	1153.7		
	3	15610.7	1269.9		
Húmeda	1	9552.1	799.1	9432.7	783.9
	2	9313.3	768.8		
	3	8754.5	732.2	**TSR**	63%

Tabla 92 - Tensión indirecta, mezcla «MT40»

Fecha de elaboración: 15 y 16 de octubre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla tibia con 40% RAP		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	17540.1	1467.3	17421.2	1450.9
	2	17228.8	1422.2		
	3	17494.7	1463.1		
Húmeda	1	14073.6	1144.2	14278.8	1162.9
	2	14251.3	1164.1		
	3	14511.5	1180.5	**TSR**	80%

Tabla 93 - Tensión indirecta, mezcla «MT50»

Fecha de elaboración: 15 y 16 de octubre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla tibia con 50% RAP		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	19154.3	1699.2	19188.2	1700.8
	2	18990.5	1680.1		
	3	19419.8	1723.1		
Húmeda	1	16806.0	1492.2	16661.7	1482.4
	2	16485.8	1465.6		
	3	16693.3	1489.3	**TSR**	87%

Tabla 94 - Tensión indirecta, mezcla «MT60»

Fecha de elaboración: 15 y 16 de octubre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla tibia con 60% RAP		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	20004.0	1791.1	20086.6	1799.5
	2	20412.2	1827.9		
	3	19843.5	1779.5		
Húmeda	1	17909.4	1604.4	17822.4	1609.2
	2	17515.1	1570.5		
	3	18042.7	1652.6	**TSR**	89%

Tabla 95 - Tensión indirecta, mezcla «MT50-135»

Fecha de elaboración: 10 y 11 de diciembre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		Mezcla tibia con 50% RAP		Promedio	
Condición	Briqueta No.	Carga máxima (N)	Resistencia a la tracción (kPa)	Resistencia (N)	Resistencia a la tracción (kPa)
Seca	1	1557.8	1436.7	1562.0	1428.8
	2	1582.1	1437.9		
	3	1546.1	1412.0		
Húmeda	1	1221.5	1081.7	1119.1	1009.2
	2	1058.6	966.7		
	3	1077.3	979.1	**TSR**	71%

Tabla 96 - Tensión indirecta, mezcla «MT60-135»

Fecha de elaboración: 10 y 11 de diciembre de 2020				INV-E-725-13	
Tipo de mezcla		**Mezcla tibia con 60% RAP**		**Promedio**	
Condición	**Briqueta No.**	**Carga máxima (N)**	**Resistencia a la tracción (kPa)**	**Resistencia (N)**	**Resistencia a la tracción (kPa)**
Seca	1	1667.4	1476.5	1605.8	1435.5
	2	1600.2	1433.0		
	3	1549.9	1397.2		
Húmeda	1	1222.5	1117.3	1241.5	1132.0
	2	1220.2	1123.9		
	3	1281.8	1154.9	**TSR**	78.9%

7.7.1. Registro fotográfico de briquetas falladas en condición «húmeda»

Tabla 97 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MC» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MC		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

Tabla 98 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

Tabla 99 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT40» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT40		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

Tabla 100 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT50» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT50		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

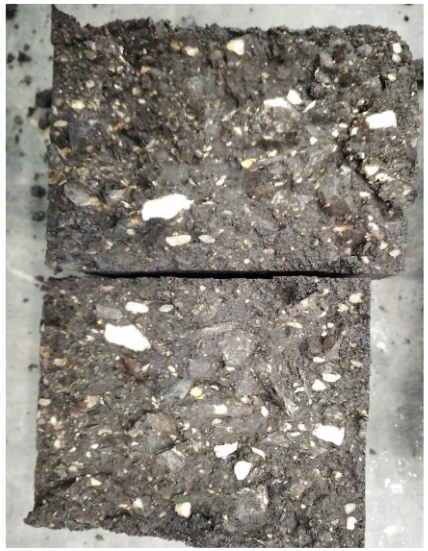
Tabla 101 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT60» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT60		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

Tabla 102 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT50-135» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT50-135		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**

Tabla 103 - Registro fotográfico - Briquetas de la mezcla «MT60-135» falladas en condición húmeda

INV-E-725-13 - TENSIÓN INDIRECTA CONDICIÓN HÚMEDA		
MEZCLA: MT60-135		
Briqueta 1	**Briqueta 2**	**Briqueta 3**
		

7.8. Curvas carga vs deformación

Tabla 104 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MC»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
211	1	21
357	1.1	36
496	1.2	50
627	1.3	63
750	1.4	75
866	1.5	87
973	1.6	97
1074	1.7	107
1166	1.8	117
1251	1.9	125
1329	2	133
1398	2.1	140
1460	2.2	146
1515	2.3	151
1562	2.4	156
1601	2.5	160
1632	2.6	163
1656	2.7	166
Total		**1992**

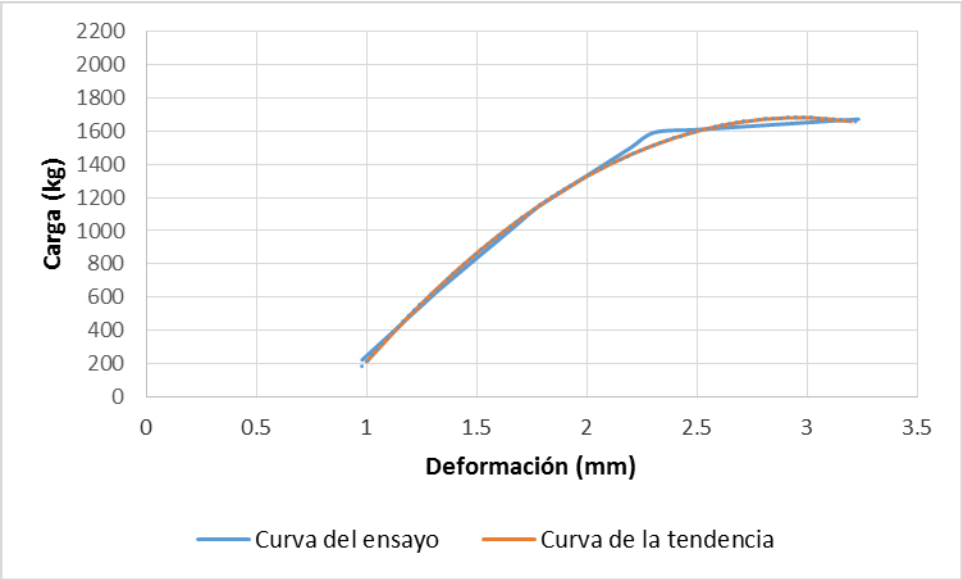


Figura 94 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MC»

Tabla 105 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
96	1	10
259	1.1	26
414	1.2	41
559	1.3	56
694	1.4	69
821	1.5	82
938	1.6	94
1045	1.7	105
1144	1.8	114
1233	1.9	123
1312	2	131
1383	2.1	138
1444	2.2	144
1495	2.3	150
1537	2.4	154
Total		**1437**

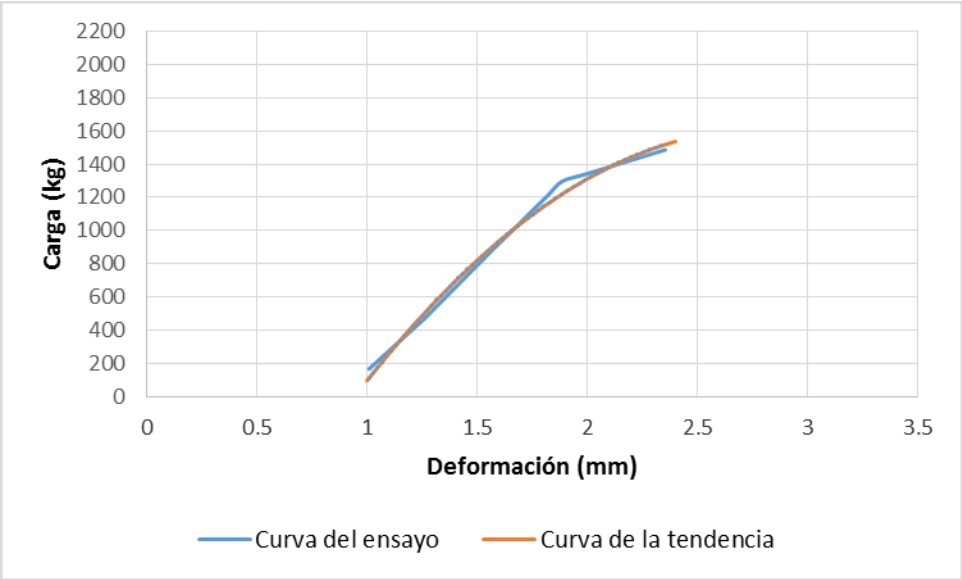


Figura 95 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT»

Tabla 106 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT40»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
56	0.7	6
246	0.8	25
429	0.9	43
604	1	60
772	1.1	77
933	1.2	93
1086	1.3	109
1232	1.4	123
1370	1.5	137
1502	1.6	150
1626	1.7	163
1742	1.8	174
Total		**1160**

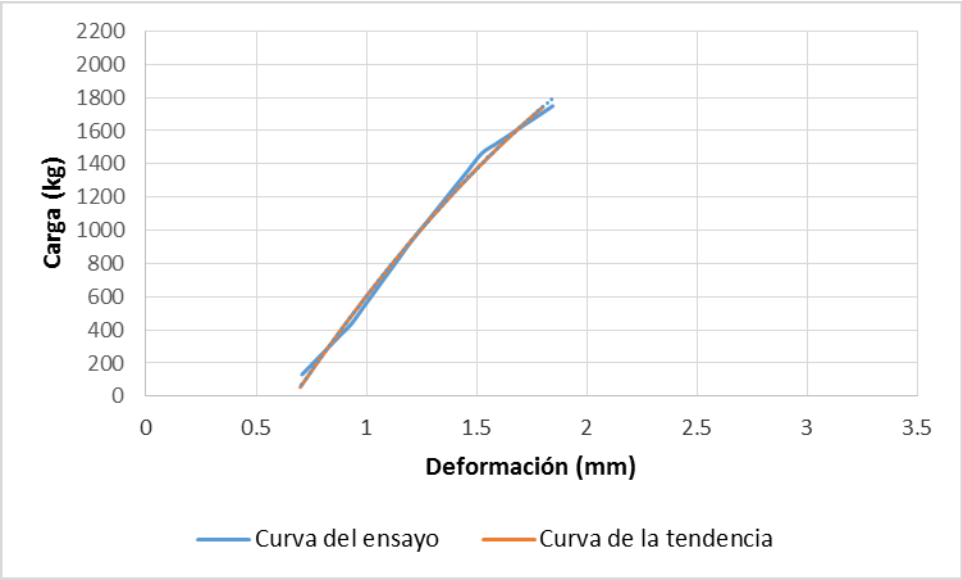


Figura 96 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT40»

Tabla 107 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
270	0.5	27
528	0.6	53
764	0.7	76
979	0.8	98
1173	0.9	117
1345	1	134
1495	1.1	149
1624	1.2	162
1731	1.3	173
1816	1.4	182
1880	1.5	188
1923	1.6	192
Total		**1553**

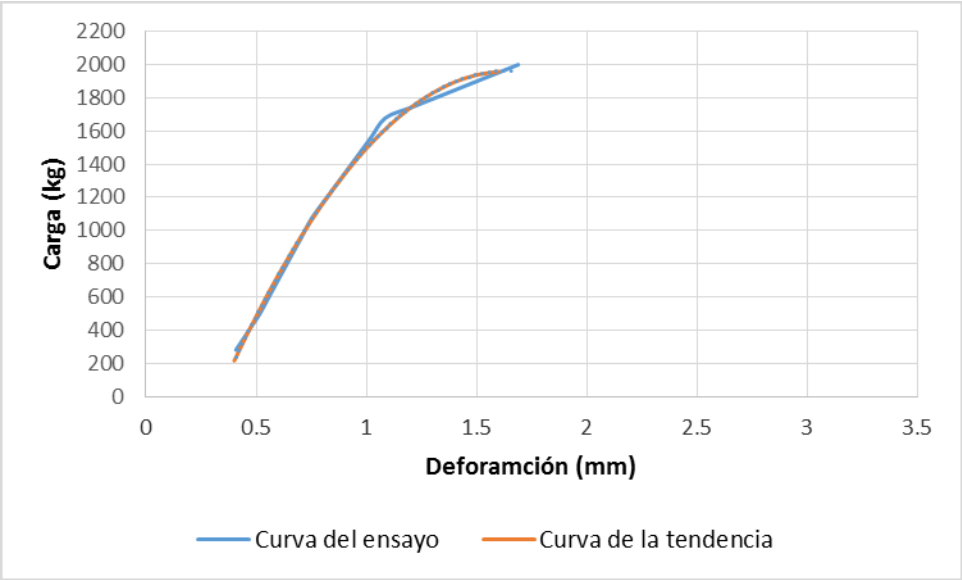


Figura 97 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50»

Tabla 108 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
215	0.4	21
485	0.5	48
732	0.6	73
957	0.7	96
1159	0.8	116
1338	0.9	134
1495	1.0	150
1629	1.1	163
1741	1.2	174
1829	1.3	183
1895	1.4	190
1939	1.5	194
1959	1.6	196
Total		**1737**

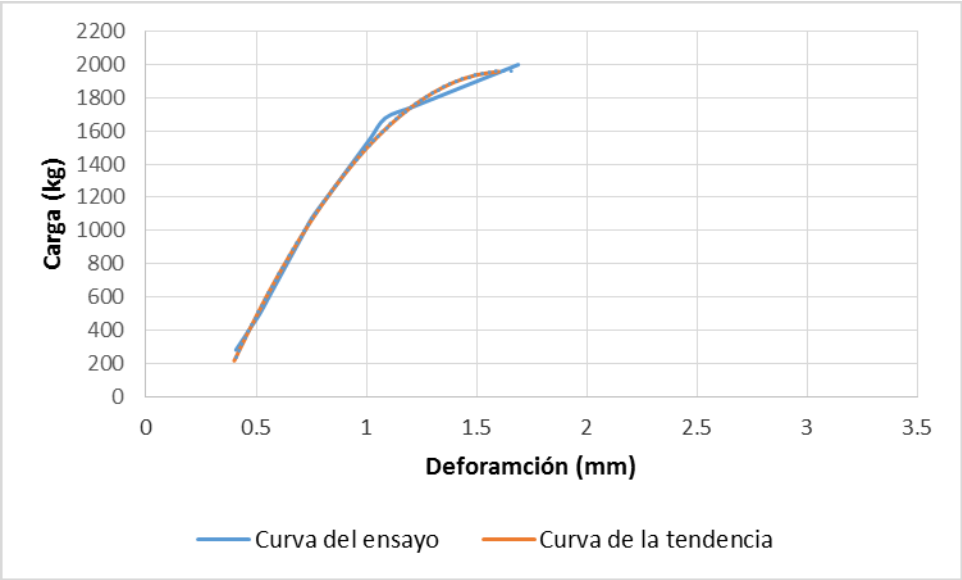


Figura 98 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60»

Tabla 109 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50-135»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
21.7	0.7	2
247.7	0.8	25
447.1	0.9	45
625.5	1	63
786.8	1.1	79
934.1	1.2	93
1069.6	1.3	107
1195.1	1.4	120
1311.9	1.5	131
1421.1	1.6	142
1523.8	1.7	152
Total		**958**

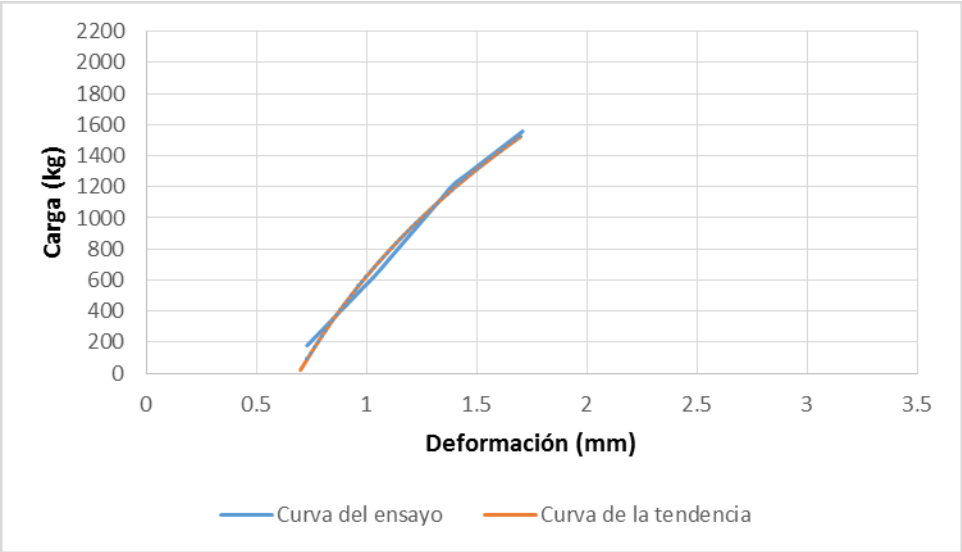


Figura 99 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT50-135»

Tabla 110 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60-135»

Carga (kg)	Deformación (mm)	Áreas (kg x mm)
20.2	0.5	2
173.2	0.6	17
335.9	0.7	34
482.1	0.8	48
604.7	0.9	60
725.9	1	73
807.3	1.1	81
890.4	1.2	89
996.1	1.3	100
1095.5	1.4	110
1179.2	1.5	118
1267.8	1.6	127
Total		**858**

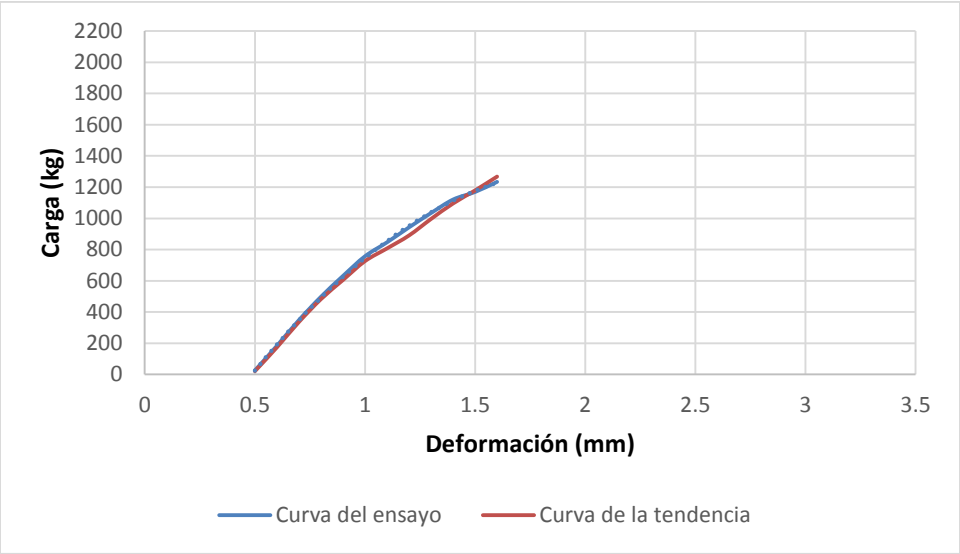


Figura 100 – Esfuerzo/deformación – Mezcla «MT60-135»