

**EFFECTO DEL GRANO DE CAUCHO EN EL AHUELLAMIENTO DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MD-12**

**BRANDON NICOLÁS OLARTE RIAÑO
RUBÉN DAVID SOLER SÁNCHEZ**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018**

**EFFECTO DEL GRANO DE CAUCHO EN EL AHUELLAMIENTO DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MD-12**

**BRANDON NICOLÁS OLARTE RIAÑO
RUBÉN DAVID SOLER SÁNCHEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de:
INGENIERO DE TRANSPORTE Y VÍAS**

**DIRECTOR ING MSc.
CARLOS HERNANDO HIGUERA SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
TUNJA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 28 de agosto del 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto, no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación.

Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

Doy gracias a Dios por brindarme salud y sabiduría por guiarme cada segundo de mi vida y por ayudarme a alcanzar mis sueños, por enseñarme a no desfallecer y que todo es posible con esfuerzo y disciplina. Principalmente a mis padres Gladys y David quienes con su apoyo y colaboración incondicional hicieron posible este sueño, por enseñarme a salir adelante sin importar las adversidades, a ustedes mamá y papá muchas gracias, sin ustedes no hubiese sido posible cumplir esta meta tan importante en mi vida.

A mi hija hermosa Nicolle Valeria Soler Holguín por ser mi mayor motivación para cumplir mi meta como profesional, quien con su inocencia e infinito amor siempre alegraba mis días en los tiempos difíciles, para ti hija hermosa dedico todos mis esfuerzos, desvelos y mi sacrificio para darte el ejemplo y la mejor enseñanza para tu vida. A mi compañera de vida mi Amor Tania Holguín, por ser mi apoyo incondicional por estar ahí siempre para mí con su cariño e infinito amor, por su esfuerzo durante este tiempo de un amor desde la distancia, pero tan único e indestructible como el nuestro. A ti mi amor quiero dedicar este logro para nuestras vidas, y así poder dar un futuro mejor para nuestra hija.

A mis hermanos Jairo, Ferney y Milenio, por brindarme todo su apoyo, consejos y amistad, por todos los bellos momentos vividos y ser el ejemplo de superación en la vida, gracias por estar ahí cuando más los he necesitado, y enseñarme siempre a estar unidos.

A mi compañero Nicolás Olarte Riaño, por su gran amistad y confianza durante la carrera, por su dedicación y esfuerzo para la realización de esta investigación, gracias por todas las experiencias vividas y estar ahí como un hermano.

RUBÉN DAVID SOLER SÁNCHEZ

Primero que todo, quiero agradecer a Dios porque con su bendición pude alcanzar la primera de las tantas metas que he planteado para mi vida personal y profesional, por regalarme salud a lo largo de mi vida y por poner en mí esa fortaleza y sabiduría que permitieron que esta etapa de mi vida culmine de la mejor manera posible, dándome claridad en esos momentos de decepción y duda, pero finalmente guiándome por el camino que él tiene trazado para mi vida.

A María Luisa, mi madre hermosa que con su esfuerzo y dedicación han hecho de mí una persona que crece y mejora diariamente, además de forjar en mí ese carácter que no me permite desfallecer a pesar de las adversidades, por inculcar en mí un sinfín de valores como responsabilidad, respeto y disciplina, por regalarme su amor y apoyo incondicional en todo momento y por ser ese motor que impulsa cada paso de mi vida, para ella van dedicados todos mis logros personales y profesionales.

A Laura y Brenda mis hermanas y a mi sobrina Sharon, quienes sin importar lo que suceda, siempre están presentes siendo en todo momento un apoyo incondicional y un motivo más para seguir logrando grandes cosas, por acompañarme a lo largo de este proceso. Espero que este logro también lo consideren como propio y podamos disfrutar muchos más momentos de felicidad en familia.

A mi compañero Rubén Soler, por su esfuerzo y dedicación que permitieron que este proyecto se pudiera desarrollar de una manera agradable en un ambiente de respeto, confianza y hermandad, el cual se vio reflejado en los resultados obtenidos a lo largo de nuestra investigación.

NICOLÁS OLARTE RIAÑO

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a nuestro director de proyecto de grado el Ingeniero Carlos Hernando Higuera Sandoval MSc., por su valiosa colaboración y por brindarnos su profesionalismo y amplio conocimiento a lo largo de este proceso, por guiarnos en cada etapa del proyecto confiando en nuestras capacidades y trabajo desarrollado día a día en la investigación, por su constante motivación para que la investigación concluyera de la manera esperada, teniendo un impacto significativo en la sociedad que se verá reflejado en nuestro éxito profesional futuro.

Al Ingeniero Gonzalo Pérez Buitrago MSc., por brindarnos sus conocimientos en el área de materiales para ingeniería, precisando diferentes ideas que nos permitieron tener una mayor claridad en el desarrollo del trabajo, así como la profundización en ciertos conceptos que nos permitieron adquirir un mejor desempeño durante la investigación.

Al Ingeniero José Manuel Sierra Arciniegas por ofrecernos su apoyo en el laboratorio de pavimentos y las herramientas necesarias para llevar a cabo nuestro proyecto, pero principalmente por brindarnos su confianza y sobre todo su amistad que permitieron el desarrollo de nuestra investigación en un ambiente agradable y familiar.

**NICOLÁS OLARTE RIAÑO
RUBÉN DAVID SOLER SÁNCHEZ**

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	22
RESUMEN	23
INTRODUCCIÓN	24
1. REVISIÓN DE LITERATURA	28
1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS	28
1.1.1 Mezclas densas en caliente (MDC)	28
1.1.2 Mezclas semidensas en caliente (MSC)	28
1.1.3 Mezclas drenante en caliente (MGC)	28
1.1.4 Mezclas de alto módulo (MAM)	29
1.2 AGREGADOS PÉTREOS	29
1.3 CEMENTO ASFÁLTICO	30
1.4 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS	31
1.4.1 Durabilidad	31
1.4.2 Estabilidad	31
1.4.3 Flexibilidad	32
1.4.4 Resistencia a la fatiga	32
1.4.5 Impermeabilidad	32
1.4.6 Resistencia al deslizamiento	32
1.4.7 Trabajabilidad	32
1.5 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE	33

1.5.1	Diseño preliminar de mezcla asfáltica	34
1.5.2	Verificación del diseño preliminar	34
1.6	DISEÑO MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL	35
1.6.1	Composición volumétrica de una mezcla asfáltica	37
1.7	GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)	43
1.7.1	Características de los neumáticos	44
1.8	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS LLANTAS	45
1.9	OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO	47
1.9.1	Proceso ambiental	47
1.9.2	Proceso por criogénesis	48
1.10	GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	49
1.10.1	Proceso vía húmeda	49
1.10.2	Proceso vía seca	50
1.11	TIEMPO DE DIGESTIÓN	51
1.11.1	Proceso de digestión del grano de caucho GCR	51
1.12	RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO MEDIANTE PÉNDULO BRITÁNICO	52
1.13	AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS	53
1.13.1	Factores que afectan la resistencia al ahuellamiento	53
1.13.2	Determinación del ahuellamiento en laboratorio	54
1.14	MÓDULO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	55
1.14.1	Determinación del módulo dinámico ensayos de laboratorio	56
1.14.2	Determinación módulo dinámico mediante correlaciones	57
1.14.3	Determinación del módulo dinámico mediante nomogramas	57
1.15	EXPERIENCIAS EMPLEANDO GRANO DE CAUCHO RECICLADO	58

2. CARACTERIZACIÓN MATERIALES DE DISEÑO MD-12	63
2.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS	63
2.1.1 Granulometría de los agregados	65
2.1.2 Ensayos de caracterización de agregados	68
2.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	71
2.2.1 Ensayos caracterización cemento asfáltico	73
2.3 CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO	75
2.3.1 Caracterización grano de caucho reciclado	77
3. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO MD – 12	80
3.1 DISEÑO PRELIMINAR MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CONVENCIONAL	81
3.2 DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO MD-12 CON ADICIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE VÍA SECA	84
3.3 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA	90
3.4 ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL	91
3.5 VERIFICACIÓN DISEÑO PRELIMINAR DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	94
3.6 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO USANDO EL PÉNDULO BRITÁNICO	97
3.7 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA O AHUELLAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA	98
4. RESULTADOS DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MD-12	100
4.1 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CONVENCIONAL	101
4.1.1 Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD-12 convencional	101
4.1.2 Verificación diseño preliminar MD-12 convencional	106
4.1.3 Verificación Índice de Película Asfáltica MD-12 Convencional	107

4.1.4 Verificación de adherencia MD-12 Convencional	107
4.1.5 Fórmula de trabajo mezcla asfáltica MD-12 convencional	109
4.2 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DEL 0.5% DE GCR	110
4.2.1 Diseño preliminar mezcla asfáltica MD-12 adición de 0.5% GCR	110
4.2.2 Verificación Diseño preliminar MD-12 con adición de 0.5% GCR	115
4.2.3 Verificación Índice Película Asfáltica MD-12 adición 0.5% GCR	116
4.2.4 Verificación de Adherencia MD-12 con adición de 0.5% GCR	116
4.2.5 Fórmula de trabajo mezcla asfáltica MD-12 adición GCR de 0.5%	118
4.3 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DEL 1.5% DE GCR	119
4.3.1 Diseño preliminar mezcla asfáltica MD-12 adición de 1.5% GCR	119
4.3.2 Verificación del diseño preliminar MD-12 adición del 1.5% GCR	124
4.3.3 Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 1.5% GCR	125
4.3.4 Verificación Adherencia MD-12 con adición de GCR de 1.5%	125
4.3.5 Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica MD-12 adición GCR 1.5%	127
4.4 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DE 2.5% DE GCR	128
4.4.1 Diseño preliminar mezcla asfáltica MD-12 adición 2.5% GCR	128
4.4.2 Verificación del diseño preliminar MD-12 adición de 2.5% GCR	133
4.4.3 Verificación Índice Película de Asfalto MD-12 con 2.5% de GCR	134
4.4.4 Verificación Adherencia MD-12 con adición de GCR de 2.5%	134
4.5 RESUMEN DISEÑO PRELIMINAR MEZCLA ASFÁLTICA MD-12	137
4.5.1 Resumen gravedad específica bulk, Gmb	137
4.5.2 Resumen gravedad específica máxima, Gmm	138
4.5.3 Resumen Estabilidad	138
4.5.4 Resumen flujo	139

4.5.5 Resumen vacíos con aire, %V	140
4.5.6 Resumen vacíos en los agregados minerales, %VAM	141
4.5.7 Resumen vacíos llenos de asfalto, %VFA	142
4.5.8 Resumen relación llenante ligante	143
4.5.9 Resumen relación estabilidad-flujo, E/F	144
5. RESUMEN VALORES ÓPTIMOS VERIFICACIÓN DISEÑO	146
5.1 VARIACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO	146
5.2 VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK	148
5.3 VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD	149
5.4 VARIACIÓN DEL FLUJO	151
5.5 VARIACIÓN DE LOS VACÍOS CON AIRE	152
5.6 VARIACIÓN ÓPTIMOS GRAVEDAD MÁXIMA MEDIDA	154
5.7 VARIACIÓN ÓPTIMOS VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES	155
5.8 VARIACIÓN ÓPTIMOS VACÍOS LLENOS DE ASFALTO, %VFA	156
5.9 VARIACIÓN ÓPTIMOS RELACIÓN LLENANTE LIGANTE	158
5.10 VARIACIÓN ÓPTIMOS RELACIÓN ESTABILIDAD-FLUJO	159
6. DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO MEDIANTE EL PÉNDULO BRITÁNICO	161
6.1 MEDIDA COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CONVENCIONAL	161
6.2 MEDIDA COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 0.5% DE GCR	163
6.3 MEDIDA COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 1.5% DE GCR	165
6.4 MEDIDA COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 2.5% DE GCR	167
6.5 COMPARACIÓN MEDIDA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO	169

7. DETERMINACIÓN MÓDULOS DINÁMICOS CORRELACIONES	172
7.1 MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO FÓRMULA DE WITCZAK	172
7.2 DETERMINACIÓN MÓDULO DINÁMICO INSTITUTO DEL ASFALTO	176
7.3 COMPARACIÓN RESULTADOS MÓDULOS DINÁMICOS	179
8. DEFORMACIÓN PLÁSTICA MEZCLA ASFÁLTICA MD-12	180
8.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CONVENCIONAL	181
8.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 0.5% GCR	183
8.3 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 1.5% GCR	185
8.4 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 2.5% GCR	187
8.5 COMPARACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12	189
9. CONCLUSIONES	194
10. RECOMENDACIONES	201
BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA	203
ANEXOS	206
ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS	207
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO	224
ANEXO C. CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO	232
ANEXO D. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA	234

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pasos para el diseño de mezcla asfáltica en caliente	33
Tabla 2. Criterios diseño preliminar mezcla asfáltica en caliente-Marshall	34
Tabla 3. Criterios verificación mezcla asfáltica en caliente-Marshall	35
Tabla 4. Componentes de las llantas	45
Tabla 5. Composición química de las llantas	46
Tabla 6. Factores que afectan el ahuellamiento en mezclas asfálticas	53
Tabla 7. Franja granulométrica MD 12	65
Tabla 8. Granulometrías de los materiales empleados	65
Tabla 9. Granulometría combinada – dosificación	67
Tabla 10. Proporciones de materiales – dosificación	67
Tabla 11. Gravedades específicas de los agregados	68
Tabla 12. Caracterización de agregados para MD-12	69
Tabla 13. Tipo de ligante asfáltico a emplear.	71
Tabla 14. Resultados obtenidos caracterización del cemento asfáltico.	73
Tabla 15. Temperaturas de mezclado y compactación	75
Tabla 16. Granulometría Grano de Caucho Reciclado.	77
Tabla 17. Gravedad específica grano de caucho reciclado	79
Tabla 18. Diagrama experimental diseño MD-12 con GCR	80
Tabla 19. Franja granulométrica MD 12	81
Tabla 20. Alternativas para el mejoramiento en el ensayo Marshall.	93
Tabla 21. Variables verificación volumétrica del diseño Marshall.	94
Tabla 22. Nomenclatura diseño método Marshall	100
Tabla 23. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 Convencional	101
Tabla 24. Resultados Ensayo Marshall Mezcla Convencional	102
Tabla 25. Resumen Diseño Marshall MD-12 Convencional	103
Tabla 26. Determinación del contenido óptimo de asfalto MD-12 Convencional	105
Tabla 27. Verificación del diseño preliminar MD-12 Convencional	106

Tabla 28. Resultados verificación MD-12 Convencional	106
Tabla 29. Índice de Película de Asfalto MD-12 Convencional	107
Tabla 30. Comprobación de saturación MD-12 Convencional	108
Tabla 31. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 Convencional	108
Tabla 32. Relación de resistencias MD-12 Convencional	108
Tabla 33. Fórmula de trabajo MD-12 Convencional	109
Tabla 34. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 0.5% GCR	110
Tabla 35. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con 0.5% GCR	111
Tabla 36. Resumen Diseño Marshall MD-12 con 0.5% GCR	112
Tabla 37. Determinación contenido óptimo de asfalto MD-12 con 0.5% GCR	114
Tabla 38. Verificación del diseño preliminar MD-12 con 0.5% GCR	115
Tabla 39. Resultados verificación MD-12 con 0.5% GCR	115
Tabla 40. Índice de Película de Asfalto MD-12 con 0.5% GCR	116
Tabla 41. Comprobación de saturación MD-12 con adición de 0.5% GCR	116
Tabla 42. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 0.5% GCR	117
Tabla 43. Relación de resistencias MD-12 con adición de 0.5% GCR	117
Tabla 44. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 0.5% GCR	118
Tabla 45. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.	119
Tabla 46. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.	120
Tabla 47. Resumen Diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.	121
Tabla 48. Determinación óptimo de asfalto MD-12 con 1.5% de GCR.	123
Tabla 49. Resultados verificación MD-12 con adición de 1.5% de GCR	124
Tabla 50. Resultados verificación MD-12 con adición de 1.5% de GCR.	124
Tabla 51. Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 1.5% de GCR.	125
Tabla 52. Comprobación de saturación MD-12 con adición de GCR de 1.5%.	126
Tabla 53. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 1.5%	126
Tabla 54. Relación de resistencias MD-12 con adición de 1.5% de GCR.	126
Tabla 55. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 1.5% GCR	128
Tabla 55. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR.	128
Tabla 56. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR.	129
Tabla 57. Resumen Diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5 de GCR.	130

Tabla 58. Determinación del óptimo de asfalto MD-12 con 2.5% de GCR.	132
Tabla 59. Resultados verificación MD-12 con adición de 2.5% de GCR	133
Tabla 60. Resultados verificación MD-12 con adición de 2.5% de GCR.	133
Tabla 61. Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 2.5% de GCR.	134
Tabla 62. Comprobación de saturación MD-12 con adición de GCR de 2.5%	135
Tabla 63. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 2.5%	135
Tabla 64. Relación de resistencias MD-12 con adición de 2.5% de GCR.	135
Tabla 65. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 2.5% GCR	136
Tabla 66. Contenido óptimo de asfalto en función de la adición de GCR	146
Tabla 67. Gravedad específica Bulk en función de la adición de GCR	148
Tabla 68. Estabilidad en función de la adición de GCR	149
Tabla 69. Flujo en función de la adición de GCR	151
Tabla 70. Vacíos con aire en función de la adición de GCR	152
Tabla 71. Valores óptimos gravedad máxima medida.	154
Tabla 72. Variación óptimos %VAM	155
Tabla 73. Valores óptimos porcentajes vacíos llenos de asfalto	157
Tabla 74. Valores óptimos Relación llenante ligante	158
Tabla 75. Valores óptimos Relación Estabilidad-Flujo	159
Tabla 76. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 Convencional.	162
Tabla 77. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 0.5% de GCR	164
Tabla 78. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 1.5% de GCR	166
Tabla 79. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 2.5% de GCR	168
Tabla 80. Resumen valores de CRD obtenidos en laboratorio	169
Tabla 81. Composición volumétrica y granulométrica mezclas asfálticas.	174
Tabla 82. Módulos Dinámicos obtenidos fórmula Dr. Witczak	175
Tabla 83. Resultados variables Instituto del Asfalto.	177
Tabla 84. Módulos dinámicos obtenidos fórmula Instituto del Asfalto.	177
Tabla 85. Deformaciones MD-12 Convencional	181
Tabla 86. Velocidad de deformación MD-12 Convencional	182
Tabla 87. Deformaciones MD-12 con adición 0.5% GCR	183
Tabla 88. Velocidad de deformación MD-12 con adición 0.5% GCR	184

Tabla 89. Deformaciones MD-12 con adición 1.5% GCR	185
Tabla 90. Velocidad de deformación MD-12 con adición 1.5% GCR	186
Tabla 91. Deformaciones MD-12 con adición 2.5% GCR	187
Tabla 92. Velocidad de deformación MD-12 con adición 2.5% GCR	188

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Parámetros para el Diseño de mezclas asfálticas- Método Marshall	36
Figura 2. Diagrama de fases típico de una mezcla asfáltica	37
Figura 3. Diagrama de fases de mezcla asfáltica	39
Figura 4. Disposición de desechos de llantas	44
Figura 5. Localización de las partes de la llanta	45
Figura 6. Proceso de trituración ambiental	47
Figura 7. Proceso de trituración criogénica	48
Figura 8. Proceso de adición de GCR-Vía Húmeda	49
Figura 9. Proceso de adición de GCR-Vía Seca	50
Figura 10. Proceso de digestión del GCR	52
Figura 11. Estados de Deformación en función del ciclo de carga.	54
Figura 12. Localización cantera Triturados Paz del Río	64
Figura 13. Acopios de material cantera Triturados Paz del Río	64
Figura 14. Cemento asfáltico utilizado en la investigación	72
Figura 15. Localización planta MPI Ltda.	72
Figura 16. Grano de Caucho Reciclado suministrado por Recyclair SAS.	76
Figura 17. Localización planta Recyclair SAS.	76
Figura 18. Almacenamiento Llantas Recyclair S.A.S.	77
Figura 19. Granulometría grano de caucho reciclado.	78
Figura 20. Tamaños de GCR a adicionar mediante vía seca.	79
Figura 21. Preparación material mezclas asfáltica convencional MD-12	82
Figura 22. Briquetas Compactadas mezcla asfáltica convencional.	84
Figura 23. Proceso de pesado del GCR para la adición mediante vía seca.	87
Figura 24. Tiempo de digestión Grano de caucho reciclado.	88
Figura 25. Proceso adición GCR mediante vía seca.	88
Figura 26. Mezclado y obtención final MD-12 modificada con GCR.	89
Figura 27. Briquetas Compactadas con adición de GCR	89

Figura 28. Baño de maría ensayo de estabilidad y flujo.	92
Figura 29. Montaje prensa Marshall LSP de la UPTC.	92
Figura 30. Montaje ensayo de tracción indirecta.	96
Figura 31. Péndulo Británico, usado para la determinación del CRD.	97
Figura 32. Wheel Tracker, usado para la determinación del ahuellamiento.	99
Figura 33. Variables de diseño Marshall MD-12 Convencional	104
Figura 34. Composición interna MD-12 Convencional	109
Figura 35. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 0.5% de GCR	113
Figura 36. Composición interna MD-12 con adición de 0.5% GCR	118
Figura 37. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR	122
Figura 38. Composición Interna MD-12 con adición de 1.5% de GCR	127
Figura 39. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR	131
Figura 40. Composición Interna MD-12 con adición de 2.5% de GCR	136
Figura 41. Medida coeficiente de resistencia empleando el péndulo británico.	161
Figura 42. Probetas ensayo de péndulo MD-12 convencional	162
Figura 43. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 0.5% de GCR	164
Figura 44. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 1.5% de GCR	166
Figura 45. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 2.5% de GCR	168
Figura 46. Juego de probetas para ahuellamiento	180

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Composición química de una llanta	46
Gráfica 2. Curvas granulométricas de los agregados	66
Gráfica 3. Dosificación agregados MD-12	68
Gráfica 4. Curva reológica cemento asfáltico AC 80-100.	74
Gráfica 5. Curva granulométrica grano de caucho reciclado	78
Gráfica 6. Curva granulométrica mezcla asfáltica convencional MD-12.	81
Gráfica 7. Granulometría MD-12 – Adición de GCR.	86
Gráfica 8. Resultados gravedad específica Bulk	137
Gráfica 9. Resultados gravedad específica máxima	138
Gráfica 10. Resultados Estabilidad	139
Gráfica 11. Resultados Flujo	140
Gráfica 12. Resultados Vacíos con aire	141
Gráfica 13. Resultados Vacíos en los agregados minerales	142
Gráfica 14. Resultados Vacíos llenos de asfalto	143
Gráfica 15. Resultados Relación llenante ligante	144
Gráfica 16. Resultados Relación Estabilidad-Flujo	144
Gráfica 17. Contenido óptimo de asfalto en función de la adición de GCR	147
Gráfica 18. Gravedad específica Bulk en función de la adición de GCR	148
Gráfica 19. Estabilidad en función de la adición de GCR	150
Gráfica 20. Flujo en función de la adición de GCR	151
Gráfica 21. Vacíos con aire en función de la adición de GCR	153
Gráfica 22. Variación valores óptimos Gravedad máxima medida (Gmm).	154
Gráfica 23. Variación óptimos %VAM	156
Gráfica 24. Variación óptimos %VFA	157
Gráfica 25. Variación valores óptimos Relación llenante ligante.	158
Gráfica 26. Variación valores óptimos Relación Estabilidad-Flujo	160
Gráfica 27. Variación del CRD de la MD-12 Convencional.	163

Gráfica 28. Variación del CRD de la MD-12 con 0.5% de GCR	165
Gráfica 29. Variación CRD MD-12 con 1.5% GCR (húmedo-seco)	167
Gráfica 30. Variación de CRD de la MD-12 con 2.5% de GCR	169
Gráfica 31. CRD en función de GCR estado seco	170
Gráfica 32. CRD en función de GCR estado húmedo	171
Gráfica 33. Módulo dinámico fórmula del Dr. Witczak.	175
Gráfica 34. Módulo dinámico fórmula Instituto del Asfalto	178
Gráfica 35. Variación módulo dinámico-Instituto del Asfalto y Dr. Witczak.	179
Gráfica 36. Curva de deformación plástica MD-12 Convencional	182
Gráfica 37. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 0.5% GCR	184
Gráfica 38. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 1.5% GCR	186
Gráfica 39. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 2.5% GCR	188
Gráfica 40. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR	189
Gráfica 41. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR	190
Gráfica 42. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR	192

GLOSARIO

AASHTO: American Association of State Highway Transportation Officials (Asociación Americana de Oficiales Estatales de Carreteras y Transporte).

AHUELLAMIENTO: También conocido como deformación plástica y se define como la deformación vertical permanente acumulada en el pavimento debido al paso repetitivo de vehículos.

ASTM: American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayos para Materiales).

CRD: Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento.

DIGESTIÓN: Proceso que se debe llevar a cabo al adicionar grano de caucho a una mezcla asfáltica para generar una adecuada interacción asfalto-caucho, en la cual las partículas de caucho absorben las fracciones aromáticas del cemento asfáltico.

GCR: Grano de Caucho Reciclado.

IDU: Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá.

INVIAS: Instituto Nacional de Vías.

MD: Mezcla asfáltica en caliente Densa, de acuerdo con la designación del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011.

NAT: Nottingham Asphalt Tester, equipo de laboratorio utilizado para la realización de ensayos como: Módulo dinámico, módulo resiliente y leyes de fatiga en muestras cilíndricas de mezclas asfálticas.

WHEEL TRACKER: Equipo de laboratorio empleado para la determinación del ahuellamiento de una mezcla asfáltica a pequeña escala en función del número de ciclos aplicados, también conocido como pista de ensayo en laboratorio.

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad determinar el efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12, el cual se adicionó por vía seca, la mezcla asfáltica de estudio está fabricada con agregados provenientes de la cantera Triturados Paz del Rio y el cemento asfáltico AC 80-100 proporcionado por la planta MPI Ltda., el grano de caucho es material suministrado por la planta RECICLAIR S.A.S.

El análisis se realizó empleando la metodología Marshall con el diseño de una mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y tres (3) mezclas asfálticas tipo MD-12 con variaciones en la adición de GCR de 0.5%, 1.5% y 2.5%, los diseños preliminares y verificación de cada una de las mezclas asfálticas se realizan según lo establecido en la sección 500-11 de las especificaciones generales de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011, obteniendo el contenido óptimo de asfalto para cada una de las mezclas asfálticas, verificando parámetros volumétricos, requisitos de estabilidad y flujo, además de la adherencia y el índice de película asfáltica.

Como complemento se realizan pruebas adicionales como la medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento el cual se desarrolló empleando el péndulo Británico según lo indicado en la norma de ensayo INV.E-792-13, además se realizó la determinación del módulo dinámico empleando las correlaciones del Dr. Witczak y del Instituto del Asfalto, con lo cual se busca dar una idea más completa en cuanto a la factibilidad del uso del grano de caucho como mejorador de mezclas asfálticas.

El efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de la mezcla asfáltica tipo MD-12, se analizó a través del ensayo de resistencia a la deformación plástica normalizado en la INV.E-756-13 del INVIAS, utilizando el Wheel Tracker aplicando presión de contacto de 7 Kg/cm² a temperatura de 60 °C, durante un periodo de 120 minutos, procedimiento realizado a todas las mezclas asfálticas de análisis.

Finalmente, se destacan las mejoras que presentó la mezcla asfáltica en cuanto al mejoramiento de una de las propiedades mecánicas más importantes en el diseño de estructuras de pavimento como es la resistencia a la deformación plástica o ahuellamiento, ante la adición del grano de caucho reciclado por vía seca, con lo cual se llega a la selección del porcentaje óptimo de GCR en el que se considera emplearlo para que la mezcla asfáltica presente mayor eficiencia desde el punto de vista mecánico, así como las mejoras en la vida útil del pavimento y la mitigación de los impactos ambientales que genera el mal manejo de llantas fuera de uso en el país.

PALABRAS CLAVE: Ahuellamiento, grano de caucho reciclado, mezcla asfáltica, deformación plástica, deslizamiento, Marshall, GCR, IDU, tipo MD-12

INTRODUCCIÓN

Según cifras del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el diagnóstico ambiental sobre generación de llantas usadas, en Colombia se producen anualmente aproximadamente 190.500 toneladas de residuos producto del reciclaje de llantas, de los cuales tan solo el 10% son reutilizados en otro tipo de producción, el restante va a rellenos sanitarios (50%) o son incinerados (40%), lo cual genera un sinnúmero de afectaciones al medio ambiente.¹

Como solución a este problema ambiental se han venido implementando una serie de tecnologías en las cuales se busca utilizar el caucho de las llantas recicladas, mediante un proceso en el cual se trituran los neumáticos fuera de uso, el cual no contiene materiales textiles, contaminantes, ni presencia de hierro, a lo cual se le conoce como grano de caucho reciclado (GCR) el cual luego de estos procesos de tratamiento, puede ser empleado de manera eficiente como agregado en la modificación de pavimentos asfálticos siendo adicionado por vía seca.

El manejo que se le da al grano de caucho es una alternativa para obtener un beneficio importante como lo es la sostenibilidad ambiental en la producción de mezclas asfálticas, además, se considera que el empleo del grano de caucho reciclado en el diseño de mezclas asfálticas puede mejorar de manera considerable las propiedades de las mezclas, lo cual puede verse reflejado en la disminución de los espesores de capas asfálticas, aportando mayor vida útil, así como un aumento en la resistencia a la fatiga y disminución en el ahuellamiento del pavimento, lo cual se traduce en disminución de costos de mantenimiento.

Debido al desconocimiento y a la poca normatividad que se tiene del método de diseño de mezclas asfálticas con adición de grano de caucho por vía seca, este aún no se desarrolla en nuestro país, pero debido a que el proceso de mezclado es muy similar al método convencional se podría considerar como una ventaja en su aplicación, por lo cual se tiene una alta perspectiva en las aplicaciones de este proceso en el mejoramiento de las mezclas asfálticas en el país.

La deformación plástica o ahuellamiento es una de las variables más importantes en el control del diseño de una estructura de pavimento, por lo cual es importante determinar valores de ahuellamiento los cuales se emplearán en el diseño de espesores de capa, algunos factores que afectan el deterioro y bajo desempeño de la vía en su etapa de funcionamiento, es por esta razón que se considera el ahuellamiento una variable significativa a analizar y dado que la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC) cuenta con los equipos necesarios

¹ MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Diagnóstico ambiental sobre generación de llantas usadas. Bogotá D.C., Colombia. 2009.

para la determinación del ahuellamiento, es factible e importante observar y analizar el comportamiento del mismo ante la adición de grano de caucho reciclado.

Por lo anteriormente enunciado, la presente investigación tiene como objetivo principal analizar el efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12, mediante su adición por vía seca y así poder ver reflejados los resultados de este comportamiento realizando el análisis desde el punto de vista de la eficiencia mecánica de cada una de las mezclas asfálticas diseñadas.

Como metodología para analizar el efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento de la mezcla asfáltica se realiza la caracterización de los materiales que componen la mezcla asfáltica como son los agregados pétreos, el grano de caucho y asfalto seleccionados para la elaboración de la misma. Para posteriormente realizar el diseño de la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y tres mezclas asfálticas tipo MD-12 con variación en la adición de grano de caucho mediante la metodología Marshall, así como verificación del cumplimiento de las especificaciones de cada una de ellas según especificaciones técnicas generales de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá 2011 (IDU) para finalmente obtener la fórmula de trabajo correspondiente a cada una de las mezclas asfálticas.

Una vez verificado el diseño de las mezclas asfálticas se realizó la comparación entre la deformación o ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y las diferentes mezclas asfálticas MD-12 diseñadas con las variaciones definidas en cuanto a la adición de grano de caucho reciclado, para de esta manera llegar a la selección del porcentaje óptimo de grano de caucho reciclado con el cual se obtiene una mezcla asfáltica de mayor eficiencia desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas.

El alcance del presente trabajo de investigación va delimitado principalmente al análisis de la eficiencia mecánica de una mezcla asfáltica a través del estudio del comportamiento del ahuellamiento, realizando una mezcla asfáltica mejorada con la adición por vía seca de diferentes porcentajes de grano de caucho reciclado y así poder determinar el porcentaje óptimo de GCR para mezclas asfálticas densas en caliente y a través de este llegar a una relación técnica que permita generar un criterio de comparación para una mezcla asfáltica tipo MD-12 y un nivel de tránsito T2-T3 según especificaciones IDU.

La principal limitación dentro del presente trabajo está relacionada con el uso del equipo de ensayos NAT con el que cuenta la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, debido a que en la actualidad no se encuentra en condiciones adecuadas de calibración y funcionamiento, lo cual dificulta la realización de ensayos como módulo resiliente, módulo dinámico y leyes de fatiga. Otra limitación consiste en la poca disponibilidad y acceso en la universidad a equipos que permitan observar en detalle los componentes químicos del grano de caucho reciclado, por

lo cual se han tomado resultados de diversos estudios relacionados, por lo cual se recomienda que en próximas investigaciones se lleven a cabo este tipo de ensayos de laboratorio que permitan analizar de manera más profunda la composición e interacción química entre los materiales que constituyen la mezcla asfáltica.

Desde hace algún tiempo se ha considerado confiable la adición de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas para su modificación (vía húmeda) y/o mejoramiento (vía seca), debido que además de mitigar problemas medioambientales reutilizando las llantas desechadas por la disminución en la emisión de compuestos volátiles, se logran mejorar considerablemente las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, tales como: aumento de la resistencia a la fatiga, disminución del ahuellamiento y aumento en su vida útil, reduciendo costos de mantenimiento a lo largo del tiempo de funcionamiento.

La utilización de grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas mediante vía seca, indica una disminución en el costo de la implementación respecto a la vía húmeda, los diferentes estudios realizados se han elaborado con el mismo porcentaje de GCR mediante los dos procesos, teniendo en cuenta que el proceso por vía seca consiste en adicionar el GCR como material fino y la metodología de vía húmeda, es el proceso que se lleva a cabo en planta y el cual consiste en mezclar el GCR con el asfalto para después adicionar al agregado, lo que conlleva a un sesgo en los resultados dados, las características, procedimientos en la fabricación de las mezclas.

Debido a los buenos resultados obtenidos en varios estudios, se han venido desarrollando diferentes estrategias por instituciones colombianas como el Instituto Nacional de Vías INVIAS y el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, las cuales una vez analizada la posible utilización del GCR en las mezclas asfálticas han adoptado medidas que incentiven la utilización del GCR como modificador de mezclas asfálticas entre las cuales se encuentra el Decreto 265 de 2016, que indica que toda obra de infraestructura de transporte que se ejecute en el Distrito Capital y adelante procesos constructivos con asfaltos, deberá incluir el uso de materiales provenientes del aprovechamiento de llantas usadas un porcentaje no menor al 25% de la totalidad del volumen de las mezclas asfálticas usada en vías vehiculares.

De igual manera el INVIAS ha establecido para los proyectos de carreteras de concesión 4G, incorporar en los pliegos de condiciones para contratación en el otorgamiento de puntaje por factor de calidad. Los incentivos y requerimientos del INVIAS para los contratistas, que consiste en asignar hasta 100 puntos a los proponentes que se comprometan con incluir en su propuesta la implementación de mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado (GCR) en una longitud no menor al 10% del total del proyecto.

El presente trabajo hace parte de los proyectos de investigación que viene adelantando el Grupo de Investigación y Desarrollo en Infraestructura Vial de la Escuela de Transporte y Vías categorizado por Colciencias en la categoría C, el cual se ha denominado “Efecto del grano de caucho en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12”, en el cual se busca analizar el comportamiento del ahuellamiento de una mezcla asfáltica modificada con diferentes porcentajes de grano de caucho reciclado, para de esta manera poder establecer el porcentaje de grano de caucho reciclado que garantice un rendimiento óptimo en el diseño de mezclas asfálticas mediante vía seca en cuanto a su eficiencia mecánica.

El presente documento se encuentra compuesto por un total de diez (10) capítulos, en los cuales se exponen diferentes conceptos necesarios para comprender el diseño de una mezcla asfáltica y las características más importantes del grano de caucho reciclado, así como la caracterización de los materiales empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica, los resultados del diseño, así como de propiedades referentes al deslizamiento, módulos dinámicos y fundamentalmente el análisis de la resistencia a la deformación o ahuellamiento de las mezclas asfálticas que son objeto de estudio.

Finalmente, se presentan las conclusiones propias de la investigación y de igual manera recomendaciones que se deben tener en cuenta para el desarrollo de próximas investigaciones que estén relacionadas, así como la bibliografía, infografía y cuatro (4) anexos en los cuales se resaltan los formatos de ensayos de laboratorio.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

A continuación, se definen y explican conceptos relacionados con el tema de investigación a desarrollar, estos conceptos son producto de investigaciones anteriormente realizadas. Con estos términos se busca permitir una comprensión más clara del objetivo principal de la investigación, tales como: tipo de mezcla, metodología de diseño de mezcla asfáltica, así como una explicación general de los ensayos a realizar sobre una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 con adición de grano de caucho reciclado adicionado por vía seca.

1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS

Una mezcla asfáltica está constituida por materiales pétreos los cuales están recubiertos con un ligante asfáltico, estos dos se combinan a temperaturas mayores a 120°C en proporciones las cuales previamente se han especificado de acuerdo a las propiedades que se esperan obtener de la mezcla. Por último, esta se compacta en función de la cantidad de tránsito a la cual se diseña la carpeta asfáltica.

Las mezclas asfálticas en caliente son las más empleadas a nivel mundial, debido a sus propiedades de flexibilidad, duración, uniformidad y resistencia, por lo cual se han generado diversas investigaciones con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas y dinámicas principalmente. Estas mezclas asfálticas se clasifican según su gradación, en Colombia se trabajan las siguientes:²

1.1.1 Mezclas densas en caliente (MDC). Las mezclas asfálticas en caliente son aquellas combinaciones de agregados pétreos, incluyendo el polvo mineral, más un ligante asfáltico, los cuales son calentados antes del proceso de mezclado, teniendo así un proceso en el cual todas las partículas queden cubiertas por el ligante asfáltico, se caracterizan principalmente por presentar porcentaje de vacíos con aire menores al 6%.

1.1.2 Mezclas semidensas en caliente (MSC). El proceso de elaboración de este tipo de mezclas es similar al de las mezclas densas en caliente, los componentes no varían ya que se utilizan agregados y cemento asfáltico, la diferencia radica en que este tipo de mezclas presenta porcentajes de vacíos con aire que se encuentran comprendidos entre el 6% y el 12%.

1.1.3 Mezclas drenante en caliente (MGC). Se fabrican con asfaltos modificados en proporciones que varían entre el 4.5% y 5% de la masa de los agregados pétreos, con asfaltos normales se aplican en vías secundarias o vías urbanas. Este tipo de

² Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450. Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2013. p.1

mezclas poseen una granulometría mayor, el porcentaje de vacíos con aire que pueden presentar estas mezclas es superior al 20%, su uso está limitado a capas de Base en la carpeta asfáltica y bacheos.

1.1.4 Mezclas de alto módulo (MAM). El proceso de elaboración de este tipo de mezclas asfálticas se realiza en caliente, se fabrican con asfaltos de mayor consistencia, es decir, más duros, a veces con asfaltos modificados, con contenidos asfálticos próximos al 6% de la masa de los agregados pétreos. Este tipo de mezclas poseen un alto módulo de elasticidad y una resistencia a la fatiga relativamente alta.

La mezcla asfáltica que se busca analizar en el presente trabajo de investigación, es una mezcla asfáltica densa en caliente de gradación continua, lo cual permite establecer que el máximo porcentaje de vacíos con aire en la mezcla es de 6%, se considera este tipo de mezcla ya que es la más común para este tipo de trabajos y además es una referente capa de rodadura habitual en Colombia.

1.2 AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados minerales necesarios para la realización de una mezcla son principalmente naturales, triturados o sintéticos. Los naturales se extraen de depósitos fluviales o glaciares, y son utilizados sin ningún procesamiento para la elaborar la mezcla asfáltica. Los agregados triturados se explotan de canteras, y reducidos a los tamaños deseados mediante trituración mecánica; mientras que el agregado sintético es un subproducto industrial, como la escoria de altos hornos.

Independientemente de la fuente; en los métodos de procesamiento o mineralogía, se espera que el agregado provea un fuerte esqueleto pétreo para resistir aplicaciones de carga repetidas. Este componente de la mezcla asfáltica presenta aporte significativo en la resistencia, principalmente los agregados disminuyen el rozamiento interno, ya que existe un mejor empaquetamiento el cual genera mayor contacto entre las partículas.³

En Colombia la normativa vigente que se debe seguir para el control de calidad y diferentes ensayos a realizar de los agregados pétreos para ser empleados en una mezcla asfáltica, es regulada por institutos como el INVIAS y el IDU; para el presente proyecto de investigación el control de calidad se encuentra enmarcado en el artículo 510-11 de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá, IDU 2011.

³ GARNICA ANGUAS, Paul, et al. Generalidades sobre mezclas asfálticas. En: Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Safandial: IMT, 2005.p. 10-11

1.3 CEMENTO ASFÁLTICO

El cemento asfáltico es un producto bituminoso semi-sólido a temperatura ambiente, elaborado a partir de hidrocarburos naturales, mediante un proceso de destilación, con contenidos bajos de productos volátiles, el cual posee propiedades aglomerantes.⁴

El cemento asfáltico se considera el material vital en la mezcla asfáltica por sus composiciones químicas, físicas y mecánicas, las cuales permiten la cohesión y adherencia con los agregados granulares. Para realizar el proceso de mezclado con los agregados el ligante asfáltico se debe calentar a altas temperaturas, lo que permite presentar características de líquido y al realizar el mezclado produce una disminución de los vacíos con aire y una mayor compactación. Por esta razón la temperatura se convierte un aspecto fundamental a la hora de la realización del mezclado y compactación de la mezcla asfáltica.

El ligante asfáltico es un material altamente impermeable y por sus propiedades de adherencia y cohesión, es capaz de resistir a altos esfuerzos instantáneos y fluir bajo la acción de cargas permanentes. Estas propiedades se pueden evidenciar en la construcción de un pavimento asfáltico, a través de las siguientes funciones:⁵

- Impermeabilizar la estructura del pavimento, haciéndolo poco sensible a la humedad y eficaz contra la penetración del agua.
- Provee una eficaz unión y cohesión entre agregados granulares, capaz de resistir la acción mecánica a la separación de sus agregados producido por las cargas vehiculares, de igual manera mejora la capacidad portante de la estructura, lo cual permite disminuir los espesores de las capas adyacentes.

El cemento asfáltico para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente debe estar en función del tipo de vía, la composición de la estructura de la capa del pavimento y la posición de la capa asfáltica. En la sección 510-11 Mezclas Asfálticas en Caliente Densas del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, en la Tabla 510.7 se estipula el tipo de ligante a emplear según el tipo de capa de la estructura de pavimento que se desee diseñar.

En Colombia el control de calidad del cemento asfáltico se define en las especificaciones técnicas de construcción del IDU en la sección 200-11. Los ensayos a realizar para la caracterización del cemento asfáltico se definen en la

⁴ Especificación Técnica de Construcción IDU. Capítulo 2. Materiales básicos. Sección 200. Pág. 1.

⁵ PINEDA, YEIMS y REY, FELIPE: Mezclas asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado. Tesis de Pregrado. Universidad Piloto de Colombia. Bogotá D.C., 2012. p. 52.

sección 700-13 de las Normas de Ensayo de materiales 2013 del INVIAS, entre los cuales se destacan los siguientes:

- Ensayo de penetración, INV-E 706-13
- Ensayo punto de ablandamiento (Método de anillo y bola), INV-E 712-13
- Viscosidad, INV-E 716-13 o INV-E 717-13
- Punto de ignición y de llama con la copa abierta de Cleveland, INV-E 709-13
- Ensayo de ductilidad, INV-E 702-13
- Peso específico, INV-E 707-13

1.4 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS

En el campo de las mezclas asfálticas siempre será importante ir en busca de aquellas que cumplan satisfactoriamente diferentes requisitos que proporcionen un óptimo funcionamiento, el cual estará relacionado con la seguridad y comodidad de las carreteras, de acuerdo con esto las principales propiedades que deben tener las mezclas asfálticas son:⁶

1.4.1 Durabilidad. Se define como la propiedad de la mezcla asfáltica que permite que el pavimento sea capaz de resistir a la desintegración debido al tránsito y a los efectos del clima. El clima se considera un factor determinante a tener en cuenta ya que afecta principalmente al asfalto de la capa superficial al entrar en contacto con el sol, el aire y el agua, puesto que produce que el cemento asfáltico pierda las propiedades aglutinantes, se oxide, se endurece y envejece, afectando la vida útil del pavimento.

1.4.2 Estabilidad. Es la capacidad de la mezcla asfáltica para resistir las cargas de tránsito sin que produzcan deformaciones excesivas. Esta propiedad depende fundamentalmente de la cohesión de la mezcla y de la fricción interna de la misma. La pérdida de estabilidad en un pavimento se traduce en ahuellamientos y ondulaciones.

La fricción interna es aportada por el material pétreo y depende del tamaño del agregado pétreo y de la rugosidad de cada una de las caras de sus partículas. Las mezclas asfálticas con materiales más gruesos y de caras angulosas tendrán mayor estabilidad que mezclas con materiales finos.

La cohesión es la fuerza aglutinante de la mezcla que depende fundamentalmente de la capacidad que tenga el asfalto de mantener unidas las partículas del agregado.

⁶ RAMIREZ, Náyade. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Santiago de Chile 2006. Memoria para optar el título de Ingeniero civil. Universidad de Chile.

Esta propiedad varía inversamente con la temperatura y aumenta con el contenido de asfalto hasta llegar a un óptimo, luego hace un efecto lubricador.

1.4.3 Flexibilidad. Se refiere a la capacidad de la mezcla asfáltica de adaptarse a las deformaciones ocasionadas por asentamientos ocurridos en la base granular y subrasante sin agrietarse de manera considerable.

1.4.4 Resistencia a la fatiga. Esta propiedad de resistencia a la fatiga es la capacidad de la estructura del pavimento asfáltico de soportar esfuerzos provocados por el tránsito o cargas repetidas, la fatiga se puede evidenciar por fisuras producidas en la capa asfáltica.

1.4.5 Impermeabilidad. Una vez se hayan compactado en obra las mezclas asfálticas deben ser totalmente impermeables, ya que si el agua llega a filtrarse a las capas inferiores se puede perder cierta capacidad de soporte de la estructura o posibles asentamientos.

1.4.6 Resistencia al deslizamiento. En la etapa de funcionamiento la estructura de pavimento debe presentar una propiedad la cual es muy importante ya que la mezcla asfáltica debe ofrecer resistencia al deslizamiento de los vehículos cuando la carretera está en estado seco, pero se debe tener en cuenta especialmente cuando el pavimento se encuentre húmedo.

1.4.7 Trabajabilidad. Esta propiedad de las mezclas asfálticas hace referencia a la capacidad de la mezcla asfáltica a acomodarse y compactarse con una mayor facilidad, adquiriendo las mejoras características de resistencia para las cuales fue diseñada.

En general, el diseño de una mezcla asfáltica debe encontrar la combinación más económica de agregados pétreos y cemento asfáltico, la cual brinde a la mezcla asfáltica las propiedades mencionadas anteriormente. El diseño de una mezcla asfáltica debe cumplir con las siguientes características:⁷

- Contener una cantidad de asfalto suficiente para asegurar un pavimento durable a través del total recubrimiento de los agregados y acomodamiento de las partículas, bajo una adecuada compactación.
- Presentar valores de estabilidad suficiente de la mezcla asfáltica para lograr satisfacer los requerimientos de servicio y las demandas del tráfico sin presentar deformaciones o desplazamientos considerables.

⁷ RAMIREZ, Náyade. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Santiago de Chile 2006. Memoria para optar el título de Ingeniero civil. Universidad de Chile.

- Al compactar en obra el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica con respecto al volumen debe ser suficiente para absorber la consolidación producto del amasado ocasionado por el paso del tránsito.
- Presentar una adecuada trabajabilidad para permitir una operación de construcción eficiente en la colocación de la mezcla asfáltica al momento de realizar la obra de pavimentación.

1.5 DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

En el campo de las mezclas asfálticas es importante realizar un proceso que se ajuste a los requerimientos del proyecto específico que se vaya a realizar, para este fin se han venido desarrollando los métodos de diseño de una mezcla asfáltica los cuales consisten principalmente en una serie de pasos con el objetivo de conseguir una serie de propiedades que satisfagan los requisitos del trabajo a realizar, entre esto se pueden destacar: la definición del tipo de mezcla en función de la granulometría (MDC, MSC, MAM); la definición del tipo de capa a diseñar (Rodadura, Intermedia, Base); la caracterización de los agregados a emplear (Gruoso, Fino, Llenante mineral); determinación de la granulometría de acuerdo al tipo de mezcla definido; caracterización del cemento asfáltico definido en función de la temperatura media de la región y el tránsito de diseño; definición de los aditivos en el caso que se requieran (adherencia o reológica).⁸

En la Tabla 1 se presentan los pasos para realizar el diseño de mezclas asfálticas los cuales se dividen en dos (2) grupos, que debido a la aceptación que tiene en Colombia el método Marshall, se han definido según lo indicado por las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías INVIAS en su versión del año 2013.

Tabla 1. Pasos para el diseño de mezcla asfáltica en caliente

Paso	Descripción
Diseño preliminar	Estabilidad y flujo Marshall
	Propiedades volumétricas
Verificación del diseño preliminar	Adherencia
	Resistencia al ahuellamiento
	Módulo resiliente
	Resistencia a la fatiga

Fuente. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450. Bogotá D.C. 2013. p. 8

⁸ GARNICA, Paul & FLORES, Mayra. Generalidades sobre mezclas asfálticas. En: Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas. Safandial: IMT, 2005.p. 32

Cabe aclarar que, al momento de realizar el proceso de diseño de una mezcla asfáltica, independientemente del método de diseño utilizado, la finalidad siempre será la de llegar a determinar la combinación de materiales adecuada que conlleve a definir el contenido óptimo de asfalto cumpliendo una serie de requisitos que correspondan, cada uno de ellos se describe de manera breve a continuación:

1.5.1 Diseño preliminar de mezcla asfáltica. Este debe cumplir con una serie de criterios en base a los cuales se definirá el contenido óptimo de asfalto de la mezcla, estos requisitos o criterios están definidos en las especificaciones generales de construcción y están en función del tipo de mezcla y del nivel de tránsito, en la Tabla 2 se presentan los criterios que se contemplan en la realización de un diseño preliminar, entre los cuales se tienen: estabilidad, flujo y las propiedades volumétricas.

Tabla 2. Criterios diseño preliminar mezcla asfáltica en caliente-Marshall

Característica	Mezclas Densas, Semidensas y Gruesas			Mezcla Alto Módulo	
	Categoría de Tránsito				
	T0 – T1	T2 – T3	T4 – T5		
<i>Compactación (golpes/cara)</i>	50	75	75	75	
<i>Estabilidad mínima (Kg)</i>	600	750	900	1500	
<i>Flujo (mm)</i>	2 – 4	2 – 4	2 – 3.5	2 – 3	
<i>Vacíos con aire %</i>	Rodadura	3 – 5	3 – 5	4 – 6	-
	Intermedia	4 – 6	4 – 6	4 – 6	4 – 6
	Base	4 – 6	4 – 6	4 – 6	-
<i>Vacíos en Agregados %</i>	Mezclas 10	≥ 16			
	Mezclas 12	≥ 15			
	Mezclas 20	≥ 14			
	Mezclas 25	≥ 13			
<i>Vacíos llenos de asfalto %</i>	70 - 80	65 – 78	65 – 75	63 - 75	
<i>Relación Llenante/Ligante</i>	0.8 – 1.2			1.2 – 1.4	
<i>Relación Estabilidad/Flujo</i>	200 – 400	300 – 500	300 – 600	-	

Fuente. Especificaciones Técnicas Generales de Construcción IDU. Capítulo 5. Revestimientos Asfálticos. Sección 510-11. Mezclas asfálticas en caliente densas, Semidensas, gruesas y de alto módulo. Bogotá D.C. 2011. p. 11-12.

1.5.2 Verificación del diseño preliminar. Una vez se tenga el diseño preliminar el cual está relacionado con la correcta definición del cometido óptimo de asfalto, este se deberá someter a las pruebas que se muestran en la Tabla 3, las cuales de igual manera tendrán un valor de requisito mínimo que garantice la obtención de una fórmula de trabajo adecuada que se ajuste al proyecto específico.

Tabla 3. Criterios verificación mezcla asfáltica en caliente-Marshall

Propiedad		Norma INV. E	Valor	Aplicabilidad
Adherencia	Resistencia retenida, % mínimo	725	80	Todas las mezclas
Resistencia a la deformación plástica, velocidad 105-120 $\mu\text{m}/\text{min}$	Temperatura > 24 °C	756	15	Tránsito NT3 (Rodadura-Intermedia)
	Temperatura \leq 24°C		20	Mezclas Alto módulo
Módulo Resiliente, MPa	Mezclas Alto módulo, mínimo a 20 °C	749	10000	Mezclas Alto módulo
	Otras mezclas			
Leyes de Fatiga	Mezclas Alto módulo, a 20 °C y 30 Hz	808	100	Obligatorio. Mezclas Alto módulo
	Otras mezclas	784		

Fuente. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450. Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua Bogotá D.C. 2013. p. 10.

1.6 DISEÑO MEZCLAS ASFÁLTICAS MÉTODO MARSHALL

La metodología para el diseño de mezclas asfálticas Marshall, fue desarrollada por el Ingeniero Bruce Marshall del Mississippi State Highway Department, la cual posteriormente fue mejorada por el Army Corps of Engineering de los Estados Unidos, quienes añadieron algunas características al procedimiento Marshall, a tal punto que llegó a ser normalizado por la ASTM D1559.

Este método es usualmente utilizado en el diseño de mezclas asfálticas en caliente con las cuales se ejecutan la mayor parte de los trabajos de pavimentación en las vías de Colombia, experimentando en laboratorio y evaluando propiedades como: estabilidad, flujo, vacíos y densidad.⁹

En la Figura 1 se presentan los parámetros involucrados en el diseño de una mezcla asfáltica empleando el método Marshall, en esta sobresalen cuatro grupos principales que son:

- Cemento asfáltico
- Agregados pétreos
- Tipo de mezcla asfáltica
- Método de diseño de la mezcla asfáltica

⁹ CACERES, María. Diseño de mezclas asfálticas. Capítulo 1. Estado del arte. Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). México, 2009. Disponible en: <<http://catarina.udlap.mx/>>

Figura 1. Parámetros para el Diseño de mezclas asfálticas- Método Marshall



Fuente. Elaboración propia

En esta metodología, las briquetas están normalizadas con una altura de 2.5” (6.35 cm) y un diámetro de 4” (10.16 cm) y cuyo peso debe ser de aproximadamente 1200 gramos. El método Marshall tiene una fase de diseño preliminar y otra fase que corresponde a la verificación del mismo. Para llevar a cabo la metodología Marshall se deben seguir las siguientes etapas:¹⁰

- Análisis de los materiales (Asfalto-Agregados-Aditivos)
- Análisis granulométrico de los agregados (Dosificación)
- Temperatura de mezclado y compactación (Curva Reológica)
- Fabricación de probetas
- Determinación densidad Bulk-Gmb
- Ensayo de Estabilidad y Flujo
- Peso específico máximo medido-Gmm (RICE)
- Análisis de densidad y vacíos
- Determinación del % Óptimo de asfalto
- Definición de la fórmula de trabajo
- Ensayos de verificación: Adherencia, fatiga, ahuellamiento y módulo resiliente

El objetivo principal de la metodología Marshall es poder determinar el contenido óptimo de asfalto para una dosificación de agregados elegida. Además, proporciona información sobre: densidades de la mezcla, porcentaje de vacíos y composición volumétrica, lo cual viene a traducirse en la obtención de la fórmula de trabajo para la mezcla asfáltica.

Para el desarrollo de la metodología Marshall, se deben caracterizar los materiales que van a conformar la mezcla, los cuales deben cumplir con algunos requisitos que están establecidos en cada país o región. En Colombia, los agregados deben

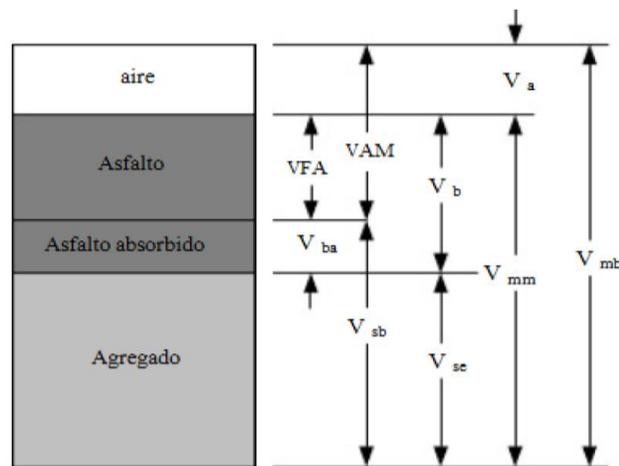
¹⁰ PEREZ BUITRAGO, Gonzalo, Método de diseño de mezclas asfálticas. Método Marshall. Diapositivas de clase. Tunja, Colombia. 2016.

cumplir generalmente con las Especificaciones Generales de Construcción del 2013 las cuales fueron desarrolladas por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), pero para el presente trabajo se analizarán los resultados con las Especificaciones Técnicas Generales de Construcción del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá-2011 (IDU).

1.6.1 Composición volumétrica de una mezcla asfáltica. En el diseño de una mezcla asfáltica se debe tener en cuenta el análisis volumétrico ya que es parte fundamental en la representación del comportamiento de la mezcla asfáltica, los parámetros volumétricos están influenciados por las proporciones definidas de agregado, asfalto y aire que es una variable importante en el diseño. En este contexto, las variables volumétricas más importantes son los vacíos con aire (V_a), los vacíos en el agregado mineral (VAM) y los vacíos llenos de asfalto (VFA).

En la Figura 2 se observa el diagrama de fases típico de una mezcla asfáltica compactada en este caso, en él se observan cada una de las variables que intervienen en la composición volumétrica de una mezcla asfáltica densa en caliente, a continuación, se definirá brevemente cada una de ellas.

Figura 2. Diagrama de fases típico de una mezcla asfáltica



Fuente. Normas de ensayo de materiales. INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas asfálticas. Artículo 799. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactas. Bogotá D.C. 2013. p. 4

Para entender de una manera más clara lo relacionado a las propiedades volumétricas se hace necesario comprender una serie de definiciones de lo que significa cada una de las variables que intervienen, además se puede apoyar el análisis en los diagramas de fases lo cuales reflejan en cierta medida el

comportamiento que puede llegar a tener la mezcla asfáltica al interactuar los elementos como agregados, asfalto y aire, principalmente. ¹¹

1.6.1.1 Gravedad específica bulk del agregado combinado, G_{sb} . Se define como la relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado, incluyendo todos los vacíos, esta G_{sb} incluye llenante mineral y en el caso del presente trabajo de investigación se incluye el grano de caucho reciclado debido a que este se empleará como reemplazo de agregado fino (vía seca). La expresión para su cálculo se presenta en la Ecuación 1:

$$G_{sb} = \frac{100}{\frac{\%G}{G_{sG}} + \frac{\%F}{G_{sF}} + \frac{\%f}{G_{sf}} + \frac{\%GCR}{G_{sGCR}}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde,

G_{sb} : gravedad específica bulk del agregado combinado

$\%G$: porcentaje de agregado grueso en la mezcla (grava)

$\%F$: porcentaje de agregado fino en la mezcla (arena)

$\%f$: porcentaje de llenante mineral en la mezcla (filler)

$\%GCR$: porcentaje de grano de caucho reciclado en la mezcla (GCR)

G_{sG} : Gravedad específica del agregado grueso

G_{sF} : Gravedad específica del agregado fino

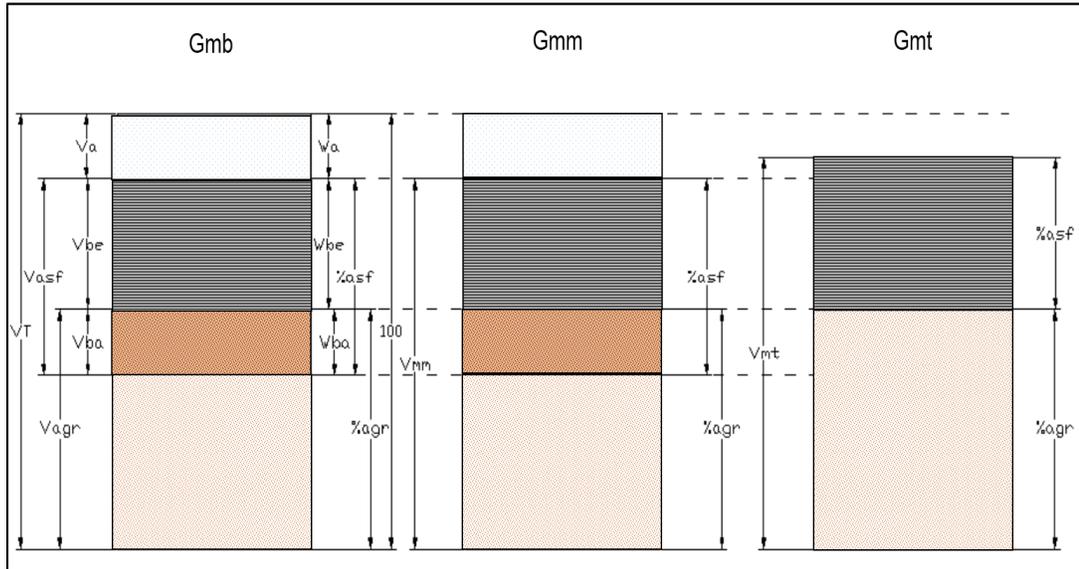
G_{sf} : Gravedad específica de llenante mineral (filler)

G_{sGCR} : Gravedad específica del grano de caucho reciclado (GCR)

En una mezcla asfáltica se pueden analizar desde tres tipos de comportamiento, el primero hace referencia a la mezcla asfáltica compacta con la gravedad específica bulk (G_{mb}) en la cual se tiene en cuenta el aire presente en ella, el segundo es sin considerar los vacíos en este caso se analiza la gravedad específica máxima (G_{mm}) y por último se tiene la gravedad total o efectiva en la cual solo se analizan los agregados y el asfalto que constituye la mezcla asfáltica. A continuación, en la Figura 3 se observan los diagramas de fases mencionados.

¹¹ Normas de ensayo de materiales. INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas asfálticas. Artículo 799. Análisis volumétrico de mezclas asfálticas compactas. Bogotá D.C. 2013. p. 6

Figura 3. Diagrama de fases de mezcla asfáltica



Fuente. Adaptado de: PEREZ BUITRAGO, Gonzalo, Método de diseño de mezclas asfálticas. Método Marshall. Diapositivas de clase. Tunja, Colombia. 2016.

1.6.1.2 Gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada, G_{mb} . Es la relación entre la masa de un volumen dado de material y la masa de un volumen igual de agua a la misma temperatura de 25 °C, esta G_{mb} se realiza de acuerdo a la norma de ensayo INV. E – 734 -13 recubriendo las briquetas con parafina, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 2:

$$G_{mb} = \frac{A}{D - E - \frac{D - A}{F}} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde,

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica

A: masa del espécimen seco al aire

D: masa en el aire del espécimen recubierto con parafina

E: masa del espécimen recubierto en parafina y sumergido en agua

F: gravedad específica de la parafina a 25 °C

1.6.1.3 Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica, G_{mm} . Es la relación entre la masa dada de mezcla asfáltica sin compactar a 25 °C y la masa de un volumen de agua a la misma temperatura, aplicando presión en un picnómetro de vacíos, la G_{mm} se realiza de acuerdo a la norma de ensayo INV. E – 735 -13, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 3:

$$G_{mm} = \frac{A}{A + B - C} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde,

G_{mm} : gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

A : masa de la muestra seca en el aire

B : masa del picnómetro lleno con agua incluyendo la tapa

C : masa del picnómetro lleno de agua con tapa y muestra

1.6.1.4 Gravedad específica efectiva del agregado, G_{se} . Relación entre la masa en estado seco de una unidad de volumen de agregado, excluyendo los vacíos permeables al asfalto y la masa de un volumen de agua a la misma temperatura, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 4:

$$G_{se} = \frac{100 - \%Asf}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{\%Asf}{G_b}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde,

G_{se} : gravedad específica efectiva del agregado

$\% Asf$: porcentaje de asfalto en la mezcla

G_{mm} : gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G_b : gravedad específica del cemento asfáltico

1.6.1.5 Volumen de agregados en la mezcla asfáltica, V_{sb} . Es el volumen total de agregados incluyendo el volumen del sólido y el de los poros permeables al agua, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 5:

$$V_{sb} = \frac{\%Agr * G_{mb}}{G_{sb}} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde,

V_{sb} : Volumen de agregados en la mezcla asfáltica

$\% Agr$: porcentaje de agregados en la mezcla

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica

G_{sb} : gravedad específica bulk del agregado combinado

1.6.1.6 Volumen de grano de caucho en la mezcla asfáltica, V_{GCR} . Es el volumen total de grano de caucho reciclado que se presenta en la mezcla asfáltica, este se definió como una relación entre las demás expresiones de cálculo relacionadas con las variables volumétricas de la mezcla asfáltica, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 6:

$$V_{GCR} = \frac{\%GCR * G_{mb}}{G_{sb}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde,

V_{GCR} : Volumen de grano de caucho en la mezcla asfáltica

$\% GCR$: porcentaje de grano de caucho reciclado en la mezcla

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica

G_{sb} : gravedad específica bulk del agregado combinado

1.6.1.7 Volumen de vacíos con aire en la mezcla asfáltica, V_a . Son los pequeños espacios de aire que se encuentran entre las partículas de agregados cubiertos con asfalto en una mezcla asfáltica compactada, se expresan como un porcentaje total del espécimen, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 7:

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm} * G_{mb}} * 100 \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde,

V_a : Volumen de vacíos con aire en la mezcla asfáltica

G_{mm} : gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica

G_{mb} : gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica

1.6.1.8 Volumen de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica, V_{be} . Es el volumen total de asfalto que cubre las partículas del agregado, es decir, es el asfalto que no es absorbido por los poros del agregado combinado, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 8:

$$V_{be} = 100 - V_{sb} - V_{GCR} - V_a \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde,

V_{be} : Volumen de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica

V_{sb} : Volumen de agregados en la mezcla asfáltica

V_{GCR} : Volumen de grano de caucho en la mezcla asfáltica

V_a : Volumen de vacíos con aire en la mezcla asfáltica

1.6.1.9 Volumen de asfalto absorbido, A_a . Es el volumen de ligante asfáltico en una mezcla asfáltica que es absorbido en los poros del agregado empleado en la mezcla asfáltica, este es de utilidad en el cálculo del contenido de asfalto efectivo, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 9:

$$A_a = \%Agr * \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} * G_{mb} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde,

A_a : Volumen de asfalto absorbido en la mezcla asfáltica

$\%Agr$: porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica

G_{se} : gravedad especifica efectiva del agregado

G_{sb} : gravedad especifica bulk del agregado combinado

G_{mb} : gravedad especifica bulk de la mezcla asfáltica

1.6.1.10 Vacíos en el agregado mineral, VAM . Es el volumen del espacio vacío entre las partículas del agregado de una mezcla asfáltica compactada, en este se incluyen los vacíos con aire y el volumen de asfalto efectivo y se expresa como un porcentaje del volumen total, la expresión de cálculo se presenta en la Ecuación 10:

$$VAM = 100 - V_{sb} \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde,

VAM : vacíos en el agregado mineral en la mezcla asfáltica

V_{sb} : Volumen de agregados en la mezcla asfáltica

1.6.1.11 Vacíos llenos de asfalto, VFA . Es la fracción de los vacíos en el agregado mineral que contiene ligante asfáltico. Estos representan el volumen de asfalto efectivo presente en la mezcla, en la Ecuación 11 se presenta la expresión de cálculo correspondiente:

$$VFA = \frac{V_{be}}{VAM} * 100 \quad (\text{Ec. 11})$$

Donde,

VFA : vacíos llenos de asfalto en la mezcla asfáltica

VAM : vacíos en el agregado mineral en la mezcla asfáltica

V_{be} : Volumen de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica

1.6.1.12 Contenido de asfalto efectivo, P_{be} . Es el contenido total de asfalto en la mezcla, menos la fracción de ligante asfáltico absorbida por las partículas del agregado, este contenido se expresa como porcentaje de la masa de la mezcla, en la Ecuación 12 se presenta la expresión de cálculo correspondiente:

$$P_{be} = \%Asf - \frac{A_a}{\%Agr} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde,

P_{be} : contenido de asfalto efectivo

$\%Asf$: porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica

$\%Agr$: porcentaje de agregado en la mezcla asfáltica

A_a : Volumen de asfalto absorbido en la mezcla asfáltica

1.6.1.13 Relación llenante ligante. Esta variable también se conoce como relación llenante/ligante, es la relación en masa, entre el porcentaje de agregado que pasa el tamiz N° 200 (filler) y el contenido de asfalto efectivo que contiene la mezcla asfáltica, en la Ecuación 13 se presenta la expresión de cálculo correspondiente:

$$\text{Relación Llenante Ligante} = \frac{\%Pasa_{200}}{P_{be}} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde,

$\%Pasa_{200}$: porcentaje de agregado que pasa el tamiz N° 200

P_{be} : contenido de asfalto efectivo

1.7 GRANO DE CAUCHO RECICLADO (GCR)

El grano de caucho reciclado (GCR) es un material que se obtiene del procesamiento de llantas las cuales ya han agotado su vida útil y entrar en desuso, estas llantas principalmente pertenecen a vehículos, en Colombia este desecho de llantas no se tiene controlado de una manera eficaz, debido a los problemas ambientales que causan los almacenamientos de llantas desechadas, generalmente estas llantas van a sitios como rellenos sanitarios o basureros sin control por parte del estado, lo cual va a generar emisiones y posibles incendios que podrían ser de significativa influencia en la contaminación ambiental.¹²

¹² Boletín Técnico N°3. Mejoras Mecánicas de las mezclas asfálticas con GCR. Instituto de Desarrollo Urbano DU, Bogotá D.C. 2015

En la Figura 4 se observa la manera en que se realiza el manejo de los neumáticos que se encuentran fuera de uso, se tiene que son almacenados en grandes cantidades en espacios abiertos lo cual genera emisiones nocivas al medio ambiente, en ocasiones se pueden presentar incendio a causa de temperaturas ambiente elevadas.

Figura 4. Disposición de desechos de llantas



Fuente. Tomado de Boletín Técnico N°3. Mejoras Mecánicas de las mezclas asfálticas con GCR. Instituto de Desarrollo Urbano IDU, Bogotá D.C. 2015

1.7.1 Características de los neumáticos. Para entender de una mejor manera la forma de obtención del grano de caucho reciclado es importante conocer el elemento de su procedencia, es decir las llantas, las cuales son objetos radiales que permiten el desplazamiento de un vehículo inventada por Charles Goodyear en 1880 quien accidentalmente desarrollo el proceso de vulcanización en el cual el caucho adquiere una resistencia y solidez necesaria para la fabricación del mismo¹³.

A continuación, se señalan los componentes de una llanta o neumático como también se le conoce a este elemento que se observa en la Figura 5, en ella se indica la ubicación de cada una de las partes que la conforman.

¹³ DUEÑAS, Ana & CALUME, Alejandro. Monografía. Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas. Bogotá D.C., 2017.

Figura 5. Localización de las partes de la llanta



Fuente: Procesos de fabricación de llantas. Michelin. Disponible en <www.michelin.com.mx>

1.8 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS LLANTAS

Para poder procesar las llantas y que estas sean útiles como componente de una mezcla asfáltica, es necesario conocer la composición química de las mismas, se debe tener en cuenta que dicha composición varía dependiendo del tipo de llanta, del tipo de vehículo, del fabricante, entre otros, pero generalmente siempre se tendrá una composición aproximada a la que se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Componentes de las llantas

Composición		
Componente	Tipo de vehiculo	
	Carro	Camion
<i>Caucho natural</i>	14%	27%
<i>caucho sintetico</i>	27%	14%
<i>Negro de humo</i>	28%	28%
<i>Acero</i>	15%	15%
<i>Otros aditivos</i>	16%	16%
<i>Peso (kg)</i>	8.6	45.4

Fuente: RODRÍGUEZ, Ellen. Uso de polvo de caucho de llanta en pavimentos asfálticos. Boletín técnico. PITRA-Lanamme UCR. Costa Rica. 2016

Además de los componentes relacionados con el caucho natural o sintético que posee una llanta, se tienen una serie de elementos o compuestos químicos que hacen parte e influyen en las principales características de una llanta, en la Tabla 5 se presentan dichos elementos químicos.¹⁴

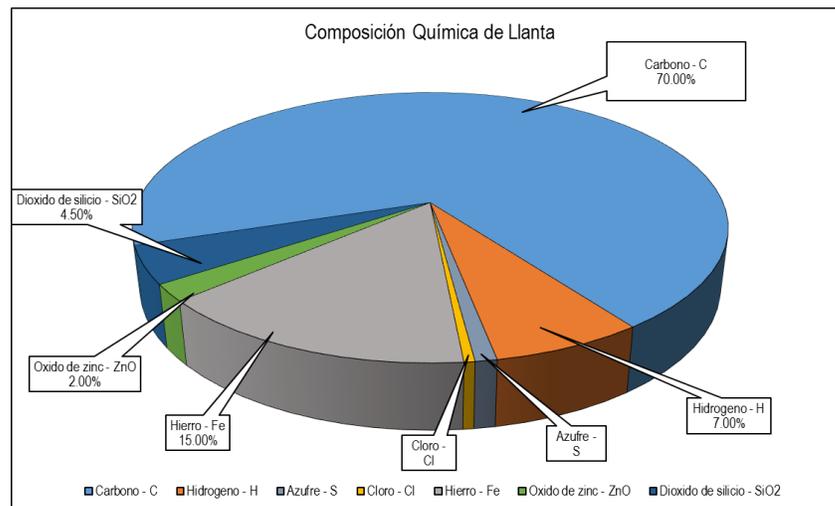
Tabla 5. Composición química de las llantas

Elemento	Composición, %
Carbono - C	70%
Hidrogeno - H	7.0%
Azufre - S	1.0%
Cloro - Cl	0.5%
Hierro - Fe	15%
Oxido de zinc - ZnO	2.0%
Dioxido de silicio - SiO2	4.5%

Fuente: RODRÍGUEZ, Ellen. Uso de polvo de caucho de llanta en pavimentos asfálticos. Boletín técnico. PITRA-Lanamme UCR. Costa Rica. 2016

A partir de los datos de composición química se presenta gráficamente estos valores con el fin de tener una mejor visualización de los mismos, principalmente en la Gráfica 1 se observa como el carbono es el elemento que se encuentra en mayor proporción en una llanta, en menor porcentaje se tienen elementos como el azufre, cloro y un elemento como el óxido de zinc que no superan el 2%.

Gráfica 1. Composición química de una llanta



Fuente. Elaboración propia a partir de los datos del Boletín técnico. PITRA-Lanamme UCR. Costa Rica. 2016

¹⁴ RODRÍGUEZ, Ellen. Uso de polvo de caucho de llanta en pavimentos asfálticos. Boletín técnico. PITRA-Lanamme UCR. Costa Rica. 2016

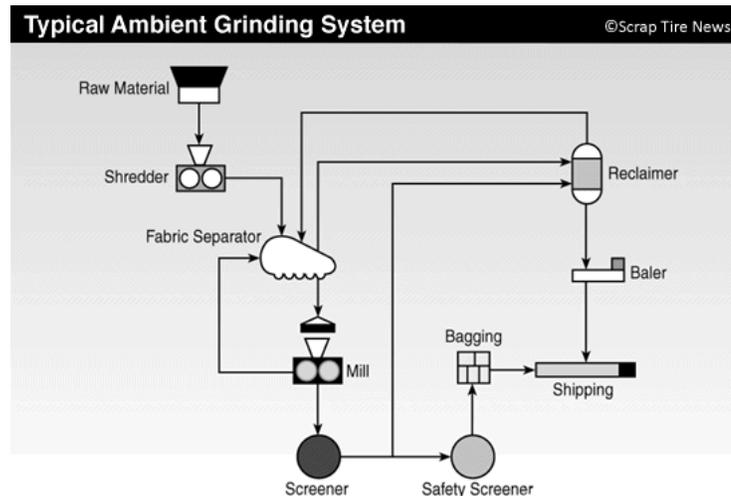
1.9 OBTENCIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO

El grano de caucho reciclado se obtiene principalmente de la trituración de los neumáticos, en este proceso se lleva a cabo una separación de sus tres elementos principales: el caucho, el acero y las fibras textiles. Dependiendo del método que se utilice en la producción el grano de caucho puede presentar variedad en sus características de forma y textura, comúnmente se realiza un proceso ambiental y un proceso de trituración criogénica.

1.9.1 Proceso ambiental. En este proceso inicialmente se deben separar los componentes metálicos o el acero que contenga la llanta para esto se utilizan separadores magnéticos, esto se hace con el fin de evitar daños en las trituradoras o molinos, de igual manera las fibras textiles se separan mediante tamizado y vibración proceso en el cual se genera compresión de las fibras. Se conoce como proceso ambiental porque se realiza a temperatura ambiente, aunque durante el proceso de molido esta aumenta aproximadamente a los 80 °C por la energía de fricción entre neumáticos y cuchillas.¹⁵

En la Figura 6 se observa un esquema representativo del proceso de trituración ambiental, en este proceso el caucho obtenido se clasifica según el tamaño de las partículas que pueden ser: cortado, astillado, en migas y en polvo. En general se tiene que este es un proceso de alta calidad en el cual se obtiene un grano de caucho limpio sin impurezas lo cual facilita su uso en diferentes aplicaciones.

Figura 6. Proceso de trituración ambiental

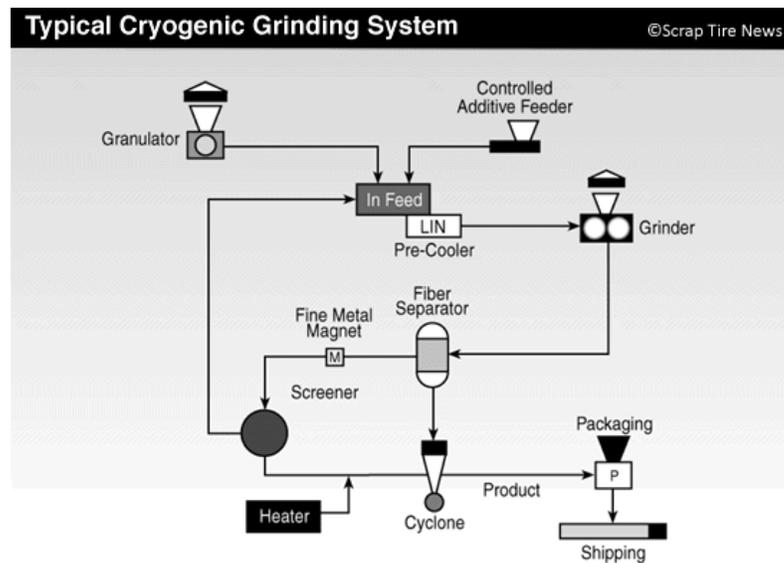


Fuente: RAHMAN, Mujibur. Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. University of Nottingham. 2004.

¹⁵ DIAZ, César & CASTRO, Carolina. Implementación del GCR para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles. Bogotá D.C., 2017

1.9.2 Proceso por criogénesis. Al igual que en el proceso de trituración a temperatura también el primer paso es realizar la separación de las partículas de acero por medio de imanes y de las fibras por medio de la aspiración y tamizado, para luego congelar los trozos de caucho antes de realizar la trituración, este congelamiento se realiza a temperaturas cercanas a los $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo cual hace que el caucho se vuelva frágil y quebradizo. En la Figura 7 se presenta un esquema del proceso de trituración criogénica.¹⁶

Figura 7. Proceso de trituración criogénica



Fuente: RAHMAN, Mujibur. Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. University of Nottingham. 2004.

Para realizar este proceso se utiliza el nitrógeno líquido generalmente, hasta alcanzar un punto en el cual el caucho se comporta como un vidrio y de esta manera se rompen en los granos de diferentes tamaños, al final se obtiene un grano irregular de aspecto brillante, lo cual hace que la reacción con el cemento asfáltico sea lenta por lo cual no se recomienda el uso de esta partícula en la modificación de mezclas asfálticas.

¹⁶ DIAZ, César & CASTRO, Carolina. Implementación del GCR para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles. Bogotá D.C., 2017

1.10 GRANO DE CAUCHO RECICLADO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

El grano de caucho es producto de un tratamiento de reciclado que se le hace a los neumáticos que ya han prestado su servicio y los cuales quedan fuera de uso, estos generalmente van a rellenos sanitarios a cielo abierto o son incinerados, lo cual ocasiona un sinnúmero de afectaciones al medio ambiente, por esta razón surge la idea de producir este grano de caucho como fuente para la creación de nuevos materiales o nuevos métodos para la fabricación de mezclas asfálticas, por ejemplo.

De acuerdo con lo anterior se ha planteado el uso del GCR como modificador de asfalto (Vía Húmeda) o como sustitución de una fracción del agregado fino de la mezcla asfáltica (Vía Seca). A continuación, se presentan las generalidades de cada proceso.

1.10.1 Proceso vía húmeda. Este proceso, el cual se observa en la Figura 8 consiste en adicionar el GCR como modificador del cemento asfáltico, con lo cual se obtendrá una mezcla asfalto-caucho, la cual es utilizada como ligante asfáltico en la fabricación de la mezcla asfáltica. En este proceso el GCR interactúa con el cemento asfáltico sin producir una reacción química, pero al mezclarse el GCR reacciona generando hinchazón y ablandamiento de sus partículas debido a la absorción de los aceites aromáticos. Las variables que influyen en esta modificación son tales como: tamaño, textura y proporción del GCR, así como tipo de asfalto, temperatura de mezclado, entre otros.¹⁷

Figura 8. Proceso de adición de GCR-Vía Húmeda



Fuente. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., 2002.

¹⁷ Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., 2002.

La principal variable a controlar en esta modificación es la viscosidad del asfalto. Para realizar el proceso húmedo se utilizan tecnologías como: tecnología McDonald, mezclado continuo y mezclado terminal. Este proceso por vía húmeda es muy conocido y el de mayor utilización en el mundo, en Colombia cuenta con sus propias especificaciones tanto en el INVIAS, como en el IDU.

En el INVIAS se encuentra el Capítulo 4, en su Artículo 413-13 “Suministro de cemento asfáltico modificado con grano de caucho” en el cual se encuentran las especificaciones para la aceptación de un ligante de asfalto modificado con GCR por vía húmeda. En el IDU se tiene como referencia el Capítulo 5, en su sección 560-11 “Mezclas asfálticas en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda”, haciendo referencia a los mismos aspectos mencionados anteriormente, incluyendo las granulometrías del GCR en ambos casos.

1.10.2 Proceso vía seca. Este proceso, aunque se ha estudiado en ciertas ocasiones, en la actualidad es muy reducida su aplicación debido a la falta de experiencias en su uso, en Colombia este no cuenta con una especificación que sirva de guía para la utilización del GCR en el diseño de mezclas asfálticas y su puesta en obra. Por vía seca el proceso que se observa en la Figura 9, consiste en mezclar el grano de caucho GCR junto con los agregados, es decir este actuaría como sustitución de una fracción o porcentaje de los agregados empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica.¹⁸

Figura 9. Proceso de adición de GCR-Vía Seca



Fuente. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., 2002.

¹⁸ Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de Los Andes. Bogotá D.C., 2002.

Aunque el GCR es tratado como agregado, de igual manera va a reaccionar con el ligante asfáltico al momento del mezclado, a este proceso se le ha denominado “digestión”, en la cual no se producen reacciones significativas por el rápido proceso de mezclado que se realiza, este tiempo debe controlarse para que no se llegue a producir una reacción similar a la ocurrida por vía húmeda. Según varias investigaciones en el mundo se estima que la proporción de GCR debería estar entre el 1% y 3% del peso total de los agregados.¹⁹

1.11 TIEMPO DE DIGESTIÓN

Al utilizar el grano de caucho reciclado como mejorador de una mezcla asfáltica se debe garantizar, que este material presente ciertas propiedades que le permitan interactuar de manera efectiva con los agregados de la mezcla asfáltica, por su adición vía seca en este caso, se ha desarrollado un concepto conocido como tiempo de digestión.

1.11.1 Proceso de digestión del grano de caucho GCR. El aporte de la incorporación de los granos de caucho para mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas depende de factores tales como: proceso de incorporación y su granulometría, porcentaje de adición y el tiempo y temperatura de reacción para el proceso húmedo y el tiempo y temperatura de digestión del caucho para el caso de la incorporación por vía seca.²⁰

El proceso de digestión del caucho comienza desde la superficie de la partícula hacia su interior, y será más rápido cuanto más fino sea el grano de caucho, menor su proporción dentro de la mezcla asfáltica y cuanto más elevada sea la temperatura de la mezcla y el tiempo que se mantenga ésta caliente durante el proceso de fabricación y compactación. Dado que el tiempo de mezclado en el proceso seco es mucho menor que en el proceso húmedo, éste no es suficiente para que se produzca una reacción similar entre el asfalto y el caucho como ocurre en el proceso húmedo.

Por lo tanto, debe existir un tiempo de digestión, con el fin de obtener la interacción entre el ligante y el caucho, si esto no ocurre se provoca que los granos de caucho tengan un comportamiento dentro de la mezcla como un agregado elástico de granulometría muy concentrada, lo que produce un aumento en los vacíos y dificultad en la compactación debido a esa elasticidad. En el caso de no realizarse correctamente el tiempo de digestión, no se producirá una reacción adecuada que

¹⁹ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Informe final contrato IDU-366-01. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. 2002.

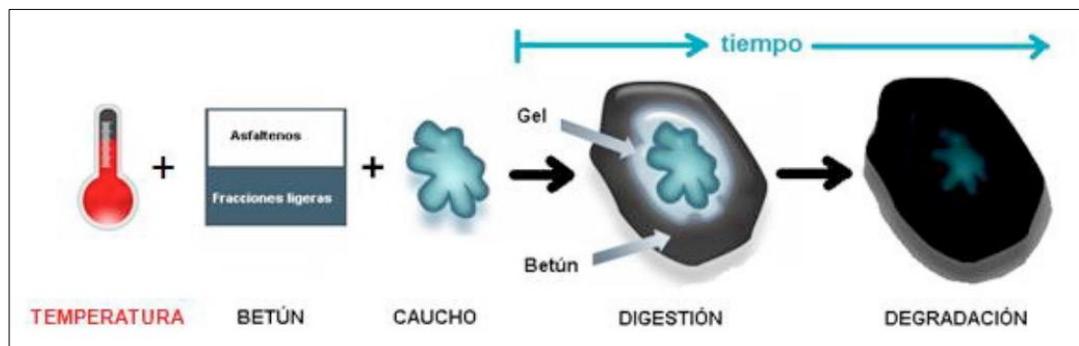
²⁰ RAMIREZ, Náyade. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Santiago de Chile 2006. Memoria para optar el título de Ingeniero civil. Universidad de Chile.

interactúe con el cemento asfáltico, por lo cual se obtendrá una mezcla de peores propiedades que las de una mezcla convencional.

Una manera de definir el tiempo y temperatura de digestión que garantice un comportamiento mecánico adecuado es mediante el ensayo de Inmersión-Compresión con el cual se mide el efecto del agua sobre la cohesión de la mezcla asfáltica compactada. Para definir la temperatura de digestión, se preparan probetas con diferentes temperaturas de digestión del caucho (150 °C, 160 °C y 170 °C). Según varios estudios el tiempo de digestión óptimo se encuentra pasada una hora y generalmente se usa dos horas, por lo cual lo más común y recomendable es utilizar un tiempo de digestión de dos horas, en el caso que no se pueda realizar el ensayo indicado.

En la Figura 10 se observa lo que ocurre durante el proceso de digestión, es decir la interacción asfalto-caucho, en esta las partículas de caucho absorben las fracciones aromáticas, por lo que aumentan de volumen. Alrededor del caucho se forma una capa blanda o gel que se desprende por el efecto de la agitación al entrar en contacto con el asfalto. Si la temperatura de digestión se eleva o se prolonga más de su tiempo de digestión, el grano de caucho tiende a desaparecer al reaccionar con el cemento asfáltico.

Figura 10. Proceso de digestión del GCR



Fuente: QUINTERO, Humberto. Diseño de asfaltos modificados con GCR por desempeño.2016

1.12 RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO MEDIANTE PÉNDULO BRITÁNICO

Este ensayo de laboratorio se encuentra especificado en la norma de ensayo del INVIAS INV.E 792-13. En la cual se describe el procedimiento para medir las propiedades superficiales de fricción (resistencia al deslizamiento) de un pavimento haciendo uso del péndulo británico. Este ensayo se puede realizar tanto en laboratorio como en campo bajo superficies planas y para medidas de pulimento

sobre muestras curvadas de laboratorio, usadas en pruebas de pulimento acelerado con llanta. Los valores numéricos obtenidos durante el ensayo con el péndulo, representan el CRD (Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento).

Es importante conocer estos valores de deslizamiento ya que proporcionan una medida de propiedades friccionales de la superficie y micro textura del pavimento, el cual gracias a este método de ensayo puede realizarse en campo y en laboratorio, además se puede utilizar para determinar el efecto relativo de procesos de pulimento sobre materiales que componen la mezcla asfáltica.²¹

1.13 AHUELLAMIENTO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS

El ahuellamiento es un tipo de falla que se produce en pavimentos asfálticos, el cual consiste en una deformación vertical permanente que ocurre por densificación durante la compactación principalmente y que se va acumulando en el pavimento debido al paso repetitivo de los vehículos, el cual genera la formación de delgadas depresiones longitudinales a lo largo de la trayectoria de las llantas, lo cual puede generar fallas estructurales y funcionales en cualquier capa de la estructura de pavimento, aunque el mayor ahuellamiento se genere en la capa asfáltica, este fenómeno es uno de los principales mecanismos de daño de capas asfálticas en estructuras de pavimentos flexibles y semirrígidos.²²

1.13.1 Factores que afectan la resistencia al ahuellamiento. Pronosticar la magnitud de ahuellamiento que pueda llegar a tener la mezcla asfáltica puede llegar a ser una tarea complicada, tal vez porque no se cuenta con los métodos o equipos adecuados para dicha finalidad, razón por la cual se ha intentado controlar la resistencia a deformaciones permanentes a través de la rigidez de la mezcla asfáltica. A continuación, se puede evidenciar los factores que afectan el fenómeno de ahuellamiento en las mezclas asfálticas y su influencia que tiene el cambio de dichos factores sobre el aumento o la disminución de las deformaciones permanentes. Dichos factores se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Factores que afectan el ahuellamiento en mezclas asfálticas

Factor		Cambio en el factor	Efecto sobre el Ahuellamiento
Agregados Pétreos	<i>Textura superficial</i>	Liso a rugoso	Incrementa
	<i>Forma</i>	Redonda a regular	Incrementa
	<i>Tamaño</i>	Incremento en tamaño máximo	Incrementa

²¹ Normas de ensayo de materiales. Instituto Nacional de Vías INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas **asfálticas**. INV.E-792-13. Bogotá D.C. 2013. Pág. 2

²² RONDON QUINTANA, Hugo A. Ahuellamiento y Fatiga mezclas **asfálticas**, 2012. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2012. Pág. 28.

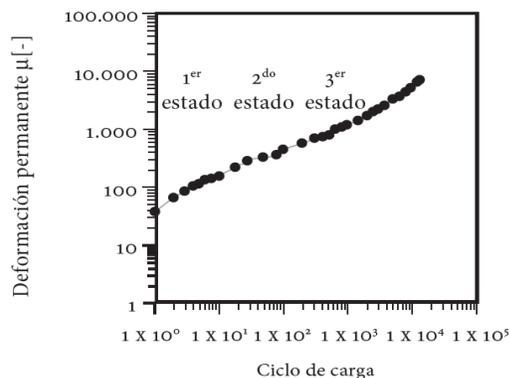
Tabla 6. (Continuación)

<i>Ligante Asfáltico</i>	<i>Rigidez</i>	Incremento	Incrementa
<i>Mezcla</i>	<i>Contenido de ligante</i>	Incremento	Disminuye
	<i>Contenido de vacíos</i>	Incremento	Disminuye
	<i>Grado de compactación</i>	Incremento	Incrementa
<i>Condiciones de Campo</i>	<i>Temperatura</i>	Incremento	Disminuye
	<i>Esfuerzo o deformación</i>	Incremento	Disminuye
	<i>Repeticiones de carga</i>	Incremento	Disminuye
	<i>Agua</i>	Seco a húmedo	Disminuye

Fuente: RONDON QUINTANA, Hugo A. Ahuellamiento y Fatiga mezclas Asfálticas, 2012. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. p.17

De igual manera Zhou y Scullin (2002), mencionan que la deformación permanente de mezclas asfálticas, medida en ensayos bajo carga cíclica en el Laboratorio, experimenta tres estados de comportamiento, como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Estados de Deformación en función del ciclo de carga.



Fuente: RONDON QUINTANA, Hugo A. Ahuellamiento y Fatiga mezclas Asfálticas, 2012. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. pág. 17

En el primer estado la deformación se acumula rápidamente producto de la densificación que experimenta la capa asfáltica por las cargas iniciales que transitan sobre el pavimento, en el segundo y tercer estado la tasa vuelve a incrementar y la deformación comienza nuevamente a acumularse con rapidez. Cabe resaltar que este de afirmación se basa en estudios realizados a muy pocos ciclos de carga en comparación con los que experimenta un pavimento en servicio.

1.13.2 Determinación del ahuellamiento en laboratorio. El ahuellamiento se puede determinar por varios procedimientos bien sea en laboratorio o a escala real, en este caso se enfatizará en el procedimiento que describe la normatividad colombiana por medio de las especificaciones generales de construcción del INVIAS bajo la norma de ensayo INV. E – 756 -13, en la cual se describe el

procedimiento para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica mediante la pista de ensayo de laboratorio.

Según esta norma el ensayo de pista de laboratorio consiste en someter una probeta de dimensiones definidas, al paso repetitivo de una rueda en condiciones controladas de presión y temperatura, midiendo en determinados periodos de tiempo la profundidad de la deformación producida. La temperatura de ensayo se deberá mantener en los 60 °C y con una presión ejercida de 900 kN/m², estas condiciones pueden variar según lo especifique un proyecto o las condiciones propias de laboratorio. Este ensayo se realiza durante 120 minutos y se reportara como resultado final un valor de velocidad de deformación en intervalos de tiempo en los cuales se evidencie claramente el comportamiento de la mezcla asfáltica.²³

1.14 MÓDULO DINÁMICO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

Existen diferentes metodologías para la determinación del módulo dinámico, entre estas se destacan, ensayos de laboratorio, mediante correlaciones y la estimación del módulo dinámico mediante nomogramas. El módulo dinámico se define como el valor absoluto de la relación entre el valor del esfuerzo máximo y la deformación unitaria máxima, como se refleja en la Ecuación 14, obtenido en un ensayo a compresión (uniaxial o triaxial), a flexión y tracción indirecta, utilizando cargas en forma seno verso o sinusoidal, sin ningún periodo de reposo y evalúa el comportamiento viscoso y elástico de la mezcla asfáltica.²⁴

$$|E| = \frac{\sigma_o}{\epsilon_o} \quad (Ec. 14)$$

Donde,

E, Módulo dinámico

σ_o , Esfuerzo de la carga axial, KPa (Lb/pulg²)

ϵ_o , Deformación axial recuperable, m/m (pulg/pulg)

El ensayo y los resultados obtenidos en el módulo dinámico de una mezcla asfáltica, permite representar un comportamiento aproximado de la mezcla asfáltica

²³ Normas de ensayo de materiales. INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas asfálticas. INV.E-756-13. Bogotá D.C. 2013. Pág. 4

²⁴ Normas de ensayo de materiales. INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas asfálticas. INV.E-754-07. Bogotá D.C. 2013. Pág. 1

diseñada, respecto al ahuellamiento en función de las diversas temperaturas y frecuencias altas que se presentan en la etapa de servicio.²⁵

1.14.1 Determinación del módulo dinámico mediante ensayos de laboratorio.

Para el cálculo del módulo dinámico mediante pruebas de laboratorio existen normas de referencia como la ASTM D3496 y D3497, AASHTO TP62. En el año 2007 el INVIAS tomó estas normas para ser utilizada en Colombia. Actualmente existen tres ensayos principales para el cálculo del módulo dinámico que son:

1.14.1.1 Ensayo de tracción indirecta. En el ensayo de tracción indirecta se aplica un esfuerzo de compresión axial sinusoidal (medio seno inverso) a un espécimen de concreto asfáltico para una temperatura y frecuencia de carga dadas. Se mide la recuperación de la deformación axial del espécimen y se emplea para calcular el módulo dinámico.²⁶

Este ensayo reproduce el estado de esfuerzos en la fibra inferior de la capa asfáltica o zona de tracción. Este método se considera práctico y sencillo, en el cual se puede caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por esfuerzos de tracción. Según las normas INV.E 753-07 e INV.E 754-07 en el ensayo de tracción indirecta para la determinación del módulo dinámico, se deben tener en cuenta las siguientes características para la realización del ensayo:

- Probeta Marshall, diámetro 4" (100mm) y altura 8" (200mm).
- Temperaturas de ensayo: 5, 25 y 40°C.
- Frecuencia: 1.4 y 16 Hz.
- Numero de ciclos: 50 a 200 ciclos.

1.14.1.2 Ensayo de tracción por compresión directa. Para la realización de este ensayo es necesario tener en cuenta principalmente que la deformación axial se mide en el punto medio de la briqueta y además es necesario seguir lo indicado en las siguientes especificaciones indicadas en la norma de ensayo ASTM D3497-79:

- Probeta cilíndrica de diámetro de 4" y altura 8".
- Temperatura del ensayo: 5, 25 y 40°C.
- Frecuencia de carga: 1.4 y 16 Hz para cada temperatura.

²⁵ NARANJO, BARRERA, Gloria, M. y CETINA, ACUÑA, Jhon F. Determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas. Tunja 2008. Tesis de Pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p. 23-25

²⁶ Normas de ensayo de materiales. INVIAS. Sección 700. Materiales y mezclas asfálticas. INV.E-754-07. Bogotá D.C. 2013.

1.14.1.3 Ensayo de tracción de una viga cargada en el tercio central. El espécimen que se debe elaborar para la ejecución del ensayo, se realiza de acuerdo a las especificaciones a la Universidad de California en Berkeley, teniendo así una viga de 1.5" (38mm) de ancho y de altura y longitud de 15" (381mm).

La determinación del módulo dinámico en el ensayo se realiza con las fórmulas basadas en la teoría de elasticidad. Estas son usadas frecuentemente para el cálculo del esfuerzo y la deformación y a su vez el módulo dinámico.

1.14.2 Determinación módulo dinámico mediante correlaciones. Así mismo para la estimación del módulo dinámico existen diversas correlaciones, de las cuales se puede hacer uso para una estimación. A continuación se enuncian las diferentes correlaciones existentes para la estimación del módulo dinámico de una mezcla asfáltica.²⁷

1.14.2.1 Fórmula de WITCZAK. Esta metodología surge como complemento de la expresión obtenida por el Dr. M. W. Witczak y otros colegas de la Universidad de Maryland, desarrollada bajo el proyecto NCHRP I-37 A "Development of a Revised Predicted Model for the Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures". Ya que el proyecto tenía diferentes limitaciones como: sólo servía para asfaltos convencionales, la geometría de los especímenes utilizados no fue estandarizada, se utilizaron granulometrías específicas, uso de diferentes métodos de compactación, y el modelo limitaba el valor del módulo dinámico. A su vez el proyecto estaba enfocado a ampliar la base de datos utilizada para el hallazgo de un modelo más general.

1.14.2.2 Fórmulas del INSTITUTO DEL ASFALTO. El instituto del asfalto basa su expresión en variables como: relaciones volumétricas de la mezcla asfáltica, frecuencia correspondiente a la velocidad de operación, temperatura de la mezcla, granulometría de los agregados y la viscosidad del asfalto.

De tal manera que en el presente trabajo de investigación se desea realizar el cálculo del módulo dinámico a la mezcla propuesta mediante las correlaciones del **Dr. Witczak** y la del **Instituto del Asfalto**.

1.14.3 Determinación del módulo dinámico mediante nomogramas. La metodología para la determinación del módulo dinámico mediante nomogramas, fue desarrollada por Bonnaure y otros (1997), basados en el módulo dinámico del asfalto y las concentraciones volumétricas del asfalto y de los agregados (Datos del diseño Marshall), elaboraron para la Shell unos ábacos que permiten predecir el

²⁷ NARANJO, BARRERA, Gloria, M. y CETINA, ACUÑA, Jhon F. Determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas. Tunja 2008. Tesis de Pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. p. 25-27

módulo dinámico o stiffness de la mezcla asfáltica. Para la aplicación de esta metodología también es necesario conocer las siguientes variables.

- Tiempo de aplicación de las cargas.
- La diferencia de temperatura, correspondiente a la diferencia entre la temperatura cuando la penetración es de 800 décimas de milímetro, (T_{800}) y la temperatura de trabajo de la mezcla (t_{mix}).
- Índice de penetración del asfalto.
- Frecuencia aplicación de la carga a una velocidad de operación dada.

1.15 EXPERIENCIAS EMPLEANDO GRANO DE CAUCHO RECICLADO

Durante mucho tiempo el desarrollo de las vías ha sido una parte fundamental en el desarrollo económico y social de cualquier región, estas carreteras se han construido durante bastante tiempo con especificaciones de calidad en cuanto a sus materiales, pero con los avances que vive el mundo, actualmente se da la necesidad de implementar nuevas tecnologías en investigación para aprovechar ciertos materiales que se consideran desechos en la mayoría de zonas del mundo.

A su vez la problemática ambiental por la que atraviesa el planeta, da campo para generar soluciones que aporten a la mitigación de la misma, en este caso bajo la utilización del grano de caucho proveniente de neumáticos desechados se busca generar pavimentos de calidad, seguridad y que contribuyan al medio ambiente, en Colombia y en el mundo se han desarrollado una serie de investigaciones en las cuales se han tocado ciertos valores de referencia, los cuales servirán de guías y se muestran a continuación:

➤ *Tecnologías de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos (Experiencias Y Normativa Española)*

En este estudio el autor hace referencia a las experiencias obtenidas en España, en la incorporación de mezclas asfálticas modificadas con GCR, el cual enuncia que desde 1996 en España se han construido más de 300 Km de mezcla asfáltica por vía seca, los estudios se desarrollaron con tamaños de cauchos menores a 0,5 mm, porcentajes de caucho de 0,5-1% y teniendo en cuenta un tiempo de digestión de 1-2 horas.

Al final de estudio se realizó una comparación de la mezcla modificada con GCR y una mezcla modificada con Polímeros, llegando a la conclusión que no existe una novedad entre estos dos tipos de mezclas asfálticas, lo cual hace factible el uso de GCR en mezclas asfálticas.

Juan Gallego Medina. España, 2008

➤ ***Mezclas asfálticas mejoradas con caucho molido proveniente de llantas usadas***

El objetivo principal de este estudio fue el de establecer la metodología a seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas utilizando caucho molido.

Teniendo en cuenta la diferente bibliografía existente, este tipo de mezcla modificado con GCR proporciona mejoras de resistencia en la misma como el aumento de la vida útil del pavimento, lo que al ser complementado con un análisis beneficio-costos permita concluir sobre las bondades en el uso del caucho molido como mejorador de mezclas asfálticas.

Obteniendo como resultados que al incorporar GCR a la mezcla asfáltica, la Estabilidad Marshall disminuye, mientras que el Flujo y los contenidos de vacíos y Ligante aumentan, también pudieron determinar que la deformación permanente indica que las mezclas con caucho son más deformables, lo que se corresponde con el valor de los módulos, y así mismo se pudo establecer que los módulos muestran menos susceptibilidad térmica de la mezcla asfáltica, lo cual favorece que no se fisure fácilmente a bajas temperaturas, ni haya un excesivo riesgo de deformabilidad a elevadas.

M. Ocampo, B. Caicedo & D. González, Colombia, 2002

➤ ***Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (gcr): estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia***

Durante la VI jornada de pavimentos y mantenimiento vial realizada en la ciudad de Bogotá, el autor durante estudio basado en la bibliografía existente, describe las ventajas y desventajas técnicas, económicas y ambientales de utilizar el grano de llanta molido como modificador de asfaltos y/o mezclas asfálticas.

De acuerdo con IDU y Universidad de Los Andes (2002) el costo/eje (beneficio-costos) puede disminuirse en un 20% y 57% cuando se modifica la mezcla por vía seca utilizando 1% y 2% de GCR respectivamente con respecto al peso total de la mezcla.

En la revisión bibliográfica diferentes actores reportan que, para el proceso por vía seca, en el diseño de una mezcla tipo MDC-2 (INVIAS, 2007) con una probabilidad de falla del 50% la vida útil se incrementó en 58% para contenidos de GCR de 1%, y 232% con 2% de GCR. Concluyendo que las mezclas con adición de grano de caucho son más durables, económicas en el largo plazo y una parte importante es que disminuyen el impacto ambiental.

Teniendo como ventajas que las mezclas son más resistentes a la fatiga y el ahuellamiento, también se han observado aumentos en la resistencia al envejecimiento, oxidación y al agrietamiento por bajas temperaturas.

Hugo Alexander Rondón Quintana, Colombia, 2011

➤ ***Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso en seco***

En este trabajo de pregrado realizado en la ciudad de Chile, como opción de grado como Ingeniera civil, en la cual se estudia el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas a las cuales se les ha incorporado caucho como material granular fino.

Para la realización del trabajo, se tomó como porcentajes de GCR de análisis de 0,5%, 1,0% y 1,5% y además se realizó la mezcla convencional sin adición de GCR con el fin de realizar la comparación con las mezclas modificadas con GCR.

La investigación arroja como resultado que el caucho reciclado obtenido de neumáticos desechados, puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) o como un modificador del ligante (proceso húmedo), además estipula que entre menor sea el tamaño máximo de los granos de caucho que se utilicen para mejorar las mezclas asfálticas o modificar el ligante, serán mejores los resultados obtenidos.

También se pudo establecer que el parámetro más crítico de la adición de caucho por la vía seca, es el tiempo de digestión, determinando así que al aumentar la temperatura de digestión con el mismo tiempo se obtienen mejores resultados de las mezclas asfálticas con caucho, mediante vía seca, obteniendo como temperatura y tiempo de digestión óptimo de 170°C/ 2 horas, mediante el ensayo Inmersión Compresión.

En el trabajo la autora logró determinar el contenido óptimo de caucho con el cual se obtuvieron los mejores valores de tracción indirecta, módulos y fatiga es de alrededor de 0,5%.

Náyade Irene Ramírez Palma, Chile, 2006

➤ ***Efecto de la utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales del pavimento***

En este trabajo realizado en la Universidad de Cataluña en el año 2009, se tenía como objetivo analizar el efecto que tiene la adición de polvo de neumático sobre

las características funcionales de una mezcla asfáltica, como son textura, deslizamiento y sonoridad, realizando la experimentación en tramos a escala real.

Obteniendo que la adición de polvo de neumático por vía seca puede absorber mayor cantidad potencial de NFU, además de obtenerse un aumento en los valores de CRT. Por otra parte, al incorporar mayor % de polvo de neumático se disminuye la textura de las mezclas, es decir tiende a cerrar la mezcla y a su vez se observa la disminución del nivel de ruido en hasta 1dB. Las mezclas con adición de polvo por vía seca son más susceptibles al desgaste especialmente a bajas temperaturas. Se ensayaron adiciones de caucho del 1% y 2%.

Josep M. Gruas, Cataluña, 2009.

➤ ***Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas***

Como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en Bogotá, el IDU y la Universidad de los Andes adelantaron este estudio, con el fin de establecer una metodología para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con caucho de llantas usadas.

Obteniendo que el GCR puede ser utilizado por vía seca de manera confiable para mejorar las propiedades mecánicas de la mezcla, esta adición mejora la resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica, pero hace que los módulos disminuyan y la deformación plástica aumente, en comparación con una mezcla convencional. El GCR incrementa la vida útil del pavimento y entre menor sea el tamaño del mismo, los resultados serán mejores. Se ensayaron adiciones de caucho del 1% y 2%.

Universidad de Los Andes, Colombia, 2002

➤ ***Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá***

Monografía que tenía como objetivo determinar la viabilidad del uso de caucho reciclado por vía seca en diseño de mezclas asfálticas recogiendo información existente de uso del caucho en la ciudad de Bogotá. Se tiene que los valores adecuados para la adición del grano de caucho están entre el 1% y el 3%.

Concluyendo que el uso del caucho es de utilidad en la rehabilitación de fallas por descascaramiento, lo cual aumentara la vida útil del área intervenida, así mismo se evidenció una disminución del ruido, además se tiene que no hay diferencia entre una mezcla convencional y una modificada con caucho en cuanto a la susceptibilidad a la humedad.

Ana Dueñas y Alejandro Calume, Colombia, 2017

➤ ***Estudio del efecto de la variación en la granulometría del caucho en mezclas asfálticas por vías seca***

El trabajo fue desarrollado como memoria para optar por el título de ingeniero civil en el cual se presentó que el contenido de caucho con el cual se obtuvieron los mayores valores de índice de resistencia conservada, tracción indirecta, Módulo resiliente y Estabilidad Marshall, y menor ahuellamiento es para 0.5% de adición de GCR.

Las mezclas asfálticas con adición de caucho tienen un mejor comportamiento al ahuellamiento que las mezclas sin adición de caucho, siendo la granulometría fina del caucho la que presenta un menor ahuellamiento, disminuyendo tal efecto en un 65% aproximadamente. En este ensayo la granulometría del caucho demostró tener influencia en el comportamiento de la mezcla ante este tipo de falla. Por lo tanto, se observa que la incorporación de caucho mejora las propiedades de la mezcla ante el efecto del ahuellamiento.

Raúl Alejandro Segovia Airaudo, Chile, 2007.

➤ ***Caracterización de mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho por vía seca***

Esta investigación se desarrolló como trabajo de doctorado en la Universidad de Nottingham, en la cual se evidenció que la resistencia a la deformación permanente a alta temperatura (60°C) de las mezclas asfálticas modificadas con GCR fue inferior a la de las mezclas asfálticas de control.

La sustitución parcial del agregado con grano de caucho de 2 a 8 mm produce una reducción sustancial en el módulo de rigidez de aproximadamente 25% para las mezclas asfálticas modificadas con GCR al 3% y 45% para las mezclas asfálticas con 5% de GCR.

Mujibur Rahman, Inglaterra, 2004.

2. CARACTERIZACIÓN MATERIALES DE DISEÑO MD-12

En el diseño de una mezcla asfáltica lo que inicialmente se debe realizar es la definición del tipo de mezcla asfáltica a trabajar, esto dependiendo de las condiciones específicas del proyecto, en la definición del tipo de mezcla se involucran factores como: el tipo de capa, el nivel de tránsito destacándose como los más importantes. De acuerdo con esto para la presente investigación se realizará el diseño de una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD – 12, para capa de rodadura y un nivel de tránsito T2-T3, la cual se trabajará bajo la guía de las especificaciones técnicas generales de materiales y construcción del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá – IDU 2011.

Una vez definido el tipo de mezcla asfáltica, uno de los parámetros más importantes para el diseño es el análisis de los materiales que se emplearán en la fabricación de la misma, para esto es necesario realizar una caracterización en laboratorio de cada uno de los materiales tales como: agregados pétreos, cemento asfáltico y grano de caucho reciclado GCR en este caso.

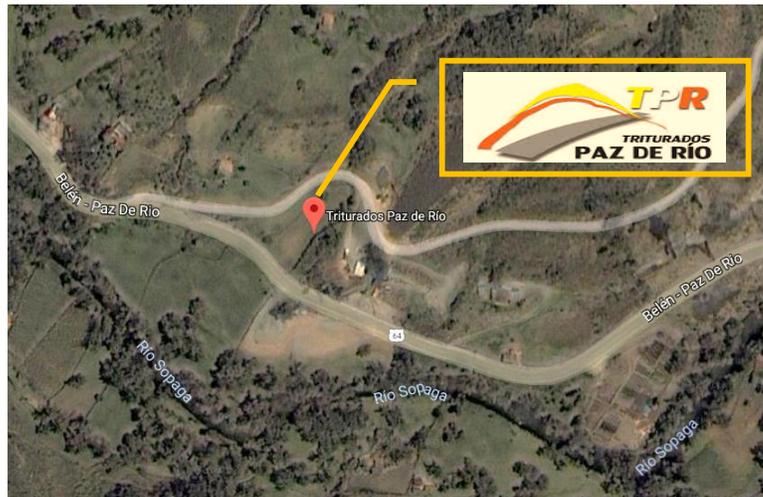
Los ensayos de laboratorio ejecutados para la caracterización de los materiales se realizarán con base en lo estipulado en las normas de ensayo de materiales para carreteras del Instituto Nacional de Vías – INVIAS 2013, en cuanto a la verificación y cumplimiento de requisitos de los materiales se emplearán las especificaciones técnicas generales de materiales y construcción del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá – IDU 2011, debido a que la mezcla se está diseñando bajo esta especificación. A continuación, se realizará la descripción de lo realizado en laboratorio, así como los resultados obtenidos en la caracterización.

2.1 CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

Uno de los parámetros fundamentales para el diseño de una mezcla asfáltica en caliente es la caracterización de los agregados pétreos, estos materiales se les debe dar un manejo adecuado y estar verificando sus propiedades periódicamente, de igual manera deben tener un control exigente en el cumplimiento de la especificación ya que de estos depende en gran medida la obtención de un óptimo diseño de la mezcla asfáltica.

Para el presente proyecto de investigación se emplearon agregados pétreos provenientes de la cantera Triturados Paz del Rio, ubicada en el departamento de Boyacá sobre la vía que de Belén conduce a Paz del Rio, como se observa a continuación en la Figura 12.

Figura 12. Localización cantera Triturados Paz del Río



Fuente. Tomado de Google Earth Pro 2018

Los agregados pétreos como tal son materiales producto de explotación y trituración de grandes extensiones de roca, obteniendo principalmente diferentes tipos de arena y grava. En Triturados Paz del Río se encuentran varios acopios de material, entre los cuales se tienen arena lavada, arena de peña, grava de tamaño máximo desde 1" hasta 3/8", además de acopios correspondientes a material denominado arena de trituración. En la Figura 13 se observa la distribución de los materiales mencionados.

Figura 13. Acopios de material cantera Triturados Paz del Río



Fuente. Elaboración propia

Los requisitos mínimos y máximos que permitirán evaluar la calidad de los agregados pétreos se encuentran en la sección 510 de las especificaciones técnicas generales de materiales y construcción del IDU 2011. En esta caracterización se evaluarán propiedades como dureza, durabilidad y geometría principalmente, para concluir si el material de agregado es apto para su uso en el diseño y fabricación de la mezcla asfáltica tipo MD-12.

2.1.1 Granulometría de los agregados. Inicialmente la granulometría se define como la distribución de los diferentes tamaños de partículas que constituyen el conjunto de agregado pétreo, esta distribución se expresa en fracciones de porcentaje en masa, el análisis granulométrico se realizó de acuerdo a lo indicado en la norma de ensayo INV. E – 213-13, además se definirá como referencia la franja granulométrica indicada en la sección 510-11 del IDU para una mezcla asfáltica densa tipo MD-12, la cual se presenta a continuación en la Tabla 7.

Tabla 7. Franja granulométrica MD 12

Mezcla MD-12		Tamiz (U.S. Standard / mm)							
		3/4" (19.00)	1/2" (12.50)	3/8" (9.50)	N°4 (4.75)	N°10 (2.00)	N°40 (0.425)	N°80 (0.180)	N°200 (0.075)
% Pasa	Min.	100	80	71	49	30	14	8	4
	Max.	100	95	87	65	44	22	16	9
	Tol.	-	± 4%			± 3%			± 2%

Fuente. Especificaciones Técnicas Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), sección 510-11 mezclas asfálticas en caliente densas.

Debido a que para la presente investigación se contó con el suministro de tres (3) tipos de material, es decir tres acopios que se tenían en la cantera, se realizó la respectiva granulometría para cada uno de ellos; a continuación, se presentan en la tabla 8 las diferentes fracciones que componen cada uno de los materiales (grava, arena de trituración y arena de peña).

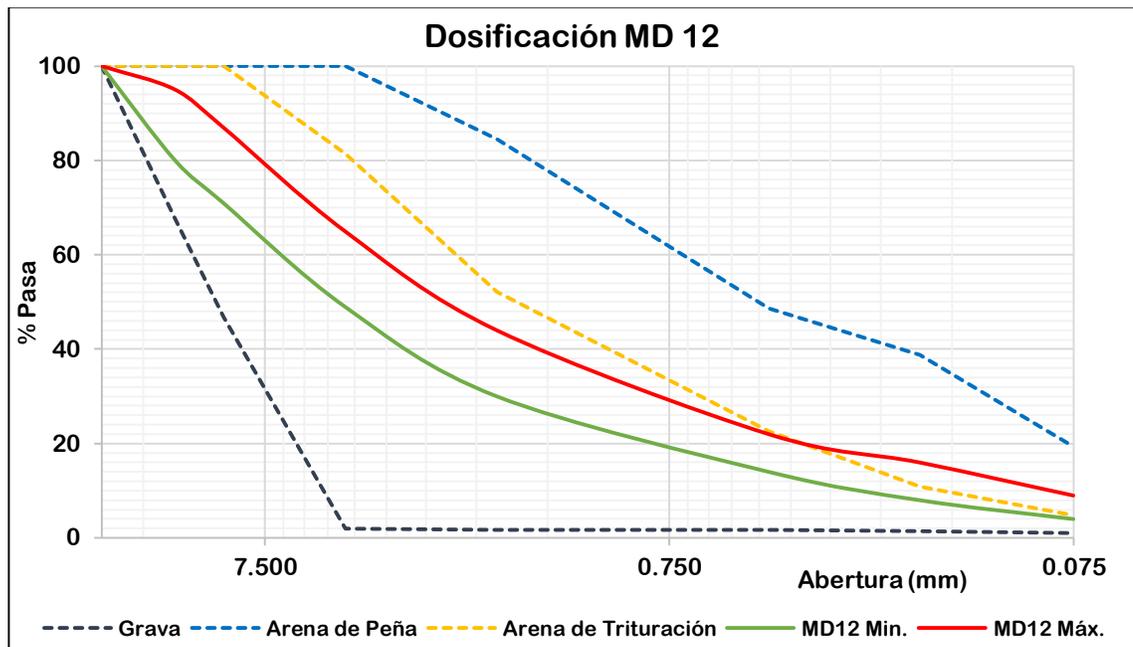
Tabla 8. Granulometrías de los materiales empleados

Tamiz	Abertura (mm)	% Pasa		
		Grava	Arena Trituración	Arena Peña
3/4"	19.00	100	100	100
1/2"	12.50	67.5	100	100
3/8"	9.50	46.7	100	100
N°4	4.750	2.0	81.4	100
N°10	2.000	1.7	52.1	84.5
N°40	0.425	1.6	22.7	48.7
N°80	0.180	1.4	10.9	38.8
N°200	0.075	1.0	4.8	19.4

Fuente. Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en la granulometría se proceden a graficar las curvas granulométricas para cada uno de los materiales de análisis y manteniendo como referencia la franja granulométrica de la especificación para una mezcla asfáltica MD-12, en la Gráfica 2 se observa el comportamiento de cada material frente a la especificación y de acuerdo con ese comportamiento se deberá realizar una dosificación de los tres materiales para lograr un ajuste adecuado en lo posible paralelo a la franja granulométrica indicada en el IDU para una mezcla asfáltica en caliente tipo MD-12.

Gráfica 2. Curvas granulométricas de los agregados



Fuente. Elaboración propia

De la Gráfica 2 se observa que el agregado grueso o grava tiene su mayor fracción retenida en el tamiz N° 4 con aproximadamente el 45%, además se tiene que para el agregado producto de la trituración las fracciones retiene N° 10 y N° 40 son las de mayor proporción con el 30% cada una aproximadamente y por último el agregado de arena de peña es el que más aportara material filler o llenante con aproximadamente el 20% de pasa tamiz N° 200. Teniendo claridad de esto es necesario realizar una dosificación de los tres materiales, de la cual se obtiene la granulometría combinada presentada en la Tabla 9.

Tabla 9. Granulometría combinada – dosificación

Tamiz	Abertura (mm)	Verificación
3/4"	19.00	100.0
1/2"	12.50	88.6
3/8"	9.50	81.3
N°4	4.750	56.4
N°10	2.000	39.3
N°40	0.425	19.2
N°80	0.180	11.8
N°200	0.075	5.7

Fuente. Elaboración propia

En la anterior tabla se observan los resultados de la granulometría combinada la cual se ajusta lo mejor posible tendiendo hacia el punto medio de las especificaciones indicadas por el IDU para una mezcla asfáltica tipo MD-12, las proporciones a emplear durante la combinación serán las presentadas en la Tabla 10, la cual se encuentra a continuación:

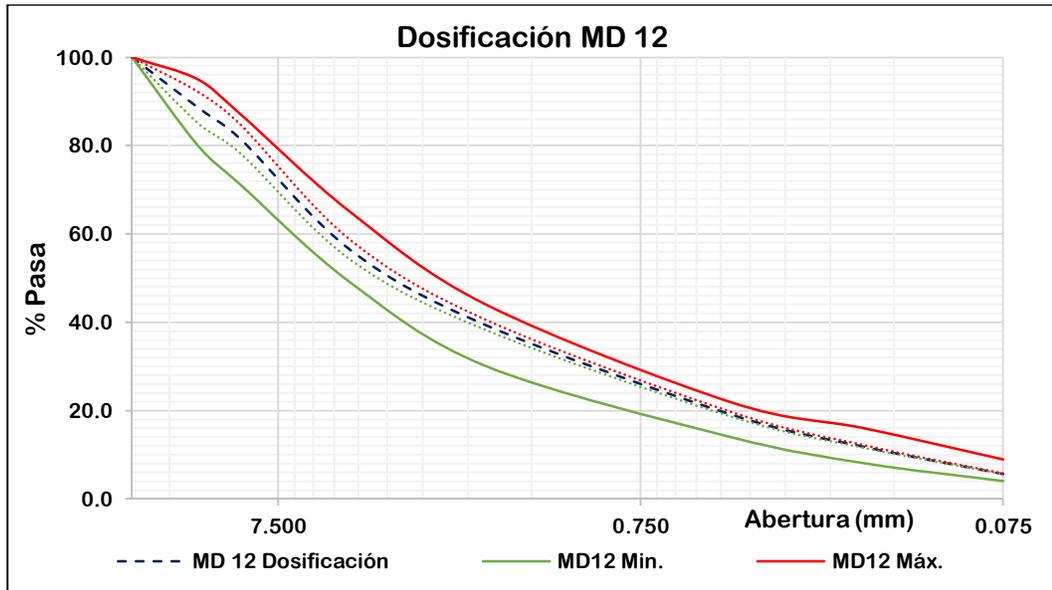
Tabla 10. Proporciones de materiales – dosificación

Materiales	<i>Grava</i>	<i>Arena Trituración</i>	<i>Arena Peña</i>
Proporciones	35 %	50 %	15 %

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 10 se presentan las proporciones obtenidas de la dosificación, en esos porcentajes se utilizaron cada uno de los materiales caracterizados en cuanto a su granulometría, a partir de esta dosificación nuevamente se realiza la curva granulométrica, la cual esta vez corresponde a la granulometría combinada anteriormente presentada en la Tabla 9. A continuación, en la Gráfica 3 se observa como ya se logra el ajuste a la mencionada franja granulométrica de una mezcla asfáltica tipo MD-12 incluyendo las correspondientes tolerancias aplicables en producción sobre la fórmula de trabajo.

Gráfica 3. Dosificación agregados MD-12



Fuente. Elaboración propia

De esta manera queda finalizado el análisis granulométrico de cada uno de los materiales que se utilizarán en el diseño de la mezcla asfáltica tipo MD-12, paso seguido se procede a realizar la caracterización del mismo, mediante los ensayos de laboratorio normalizados por el INVIAS en sus especificaciones del 2013.

2.1.2 Ensayos de caracterización de agregados. Una vez se logró definir la granulometría y dosificación del agregado pétreo, es necesario proceder a caracterizarlo mediante ensayos de laboratorio con los cuales se consiga verificar el cumplimiento de los requisitos estipulados en las especificaciones y de esta manera poder continuar con el diseño de la mezcla. Inicialmente se realizó la determinación de las gravedades específicas para cada uno de los materiales, estas variables son necesarias para poder desarrollar la metodología Marshall en el diseño de la mezcla asfáltica.

En la Tabla 11 se presentan los resultados luego de aplicar las respectivas normas de ensayos del INVIAS para la determinación de las gravedades específicas bulk de cada uno de los materiales, cabe aclarar que esto se realizó sobre la granulometría combinada según los resultados obtenidos anteriormente.

Tabla 11. Gravedades específicas de los agregados

Material	Proporción	Gravedad Específica
<i>Agregado Grueso</i>	43.6 %	2.597
<i>Agregado Fino</i>	50.7 %	2.654
<i>Filler (llenante)</i>	5.7 %	2.548

Fuente. Elaboración propia

Por último, se realiza la caracterización con el fin de evaluar los requisitos y el comportamiento de los agregados, para este caso vale aclarar que en las especificaciones del IDU se definen los ensayos dependiendo de su fracción, es decir, se realiza caracterización de agregado grueso y fino por separado, aunque para ciertas propiedades los ensayos se aplican a la granulometría combinada. En la Tabla 12 se observan los resultados obtenidos en laboratorio correspondientes a la caracterización de los agregados.

Tabla 12. Caracterización de agregados para MD-12

CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PARA MEZCLA ASFÁLTICA MD-12				
Característica	Norma INV.E-	Requisito T2-T3	Ensayo	Observación
DUREZA				
Desgaste Los Angeles 500 Rev. (% máximo)	218-13	30	16.7	CUMPLE
Micro Deval (% máximo)	238-13	25	13.9	CUMPLE
10% de finos, valor en seco (kN mínimo)	224-13	75	125.4	CUMPLE
DURABILIDAD				
Solidez en sulfato de magnesio Grueso (% máximo)	220-13	18	1.4	CUMPLE
Solidez en sulfato de magnesio Fino (% máximo)			1.6	CUMPLE
GEOMETRÍA				
Partículas fracturadas 1 Cara (% mínimo)	227-13	75	100	CUMPLE
Partículas fracturadas 2 caras (% mínimo)		50	100	CUMPLE
Índice de aplanamiento (% máximo)	230-13	25	10.6	CUMPLE
Índice de alargamiento (% máximo)		25	6.3	CUMPLE
Angularidad de la fracción fina (% mínimo)	239-13	45	48.2	CUMPLE
LIMPIEZA				
Impurezas Agr. Grueso (% máximo)	237-13	0.5	0.32	CUMPLE
Índice de plasticidad (% máximo)	126-13	NP	NP	CUMPLE
Equivalente arena (% mínimo)	133-13	40	66	CUMPLE
Valor de Azul de metileno (mg/g máximo)	235-13	8	5	CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

Nota: en el anexo A se encuentran los respectivos formatos diligenciados para cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio.

En la Tabla 12 se encuentra el valor obtenido en laboratorio comparado con el requisito de especificación y finalmente la observación en cuanto al cumplimiento del material, en esta tabla se puede observar en detalle como el agregado cumple satisfactoriamente con todos los requisitos que se exigen en las especificaciones de construcción del IDU en su sección 510-11. De igual manera se puede evidenciar que:

En cuanto a las propiedades de dureza, se tiene que en el desgaste por medio de la máquina de los ángeles el material tiene una buena resistencia a la degradación ya que el valor obtenido está por debajo del valor máximo especificado. En el ensayo del micro Deval de igual manera se tiene un valor considerablemente bajo el cual es indicador de una buena resistencia a la abrasión del material utilizado, además al evaluar la resistencia mecánica que tiene el agregado al aplastamiento se observa como el material es altamente resistente cumpliendo con el requisito mínimo de la norma. En general se determinó que el material tiene buenas propiedades de resistencia y su dureza es adecuada para continuar con el diseño de la mezcla asfáltica.

Ahora al evaluar las propiedades geométricas del material se obtiene que este cumple sin ningún problema, esto principalmente se debe a que el material es producto de la explotación y trituración mecánica por lo cual la totalidad de sus partículas en este caso son fracturadas lo cual no representa problema para utilizarse en el diseño de la mezcla asfáltica. Para la fracción fina con el valor obtenido en el ensayo de angularidad se logra tener una idea de la buena manejabilidad de la mezcla en sus procesos de mezclado y compactación lo cual se verá reflejado en el acomodamiento de las partículas y en la resistencia al ahuellamiento.

La propiedad de durabilidad hace referencia principalmente a la resistencia que puede llegar a tener el agregado ante condiciones atmosféricas severas, como la intemperie, teniendo en cuenta esto se evidencia que el agregado tiene una buena durabilidad ya que su pérdida en masa no alcanza ni el 2% en ninguna de sus fracciones (gruesa y fina), cabe indicar que el ensayo se realizó durante cinco ciclos de inmersión y secado empleando sulfato de magnesio.

Por último, se tiene la limpieza del material principalmente el ensayo de equivalente arena el cual representa la contaminación que pueda llegar a tener el material ante la presencia de materiales arcillosos o plásticos los cuales pueden representar una disminución en la adherencia de la mezcla asfáltica, este ensayo se realizó al agregado combinado debido a que solo la arena de trituración presenta valores muy bajos de equivalente arena, una vez combinado si se obtiene un valor que satisface los requerimientos del IDU, por otra parte se obtiene que el material no presenta plasticidad lo cual es algo favorable para la fabricación y comportamiento de la mezcla asfáltica.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Los productos asfálticos se obtienen de la refinación del crudo, del cual bajo un proceso de destilación se puede obtener el cemento asfáltico, se considera de gran importancia dentro de la mezcla asfáltica, ya que este permite la cohesión y la adherencia con los agregados gruesos. El ligante asfáltico al calentarse se ablanda y a altas temperaturas se vuelve líquido.

El material bituminoso para la elaboración de la mezcla asfáltica en caliente debe ser seleccionado en función de:

- Características climatológicas de la zona.
- Tipo de capa.
- Condiciones de operación de la carretera.

El IDU en la sección 510-11 en la Tabla 510.7, presenta una guía para la determinación del tipo de cemento asfáltico a emplear según la capa de pavimento a diseñar y el nivel de tránsito de diseño como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13. Tipo de ligante asfáltico a emplear.

Capa	Categoría de Tránsito			
	T0-T1	T2-T3	T4	T5
<i>Rodadura o intermedia</i>	80-100	80-100	60-70 80-100	60-70 Tipo II o III
<i>Base</i>	-	80-100	80-100	60-70 80-100
<i>Mezclas de alto Módulo</i>	-	-	Tipo V	Tipo V

Fuente: Especificación técnica IDU. Sección 510-11. Mezclas asfálticas en caliente Densas, Semidensas, Gruesas y de Alto Módulo.

El cemento asfáltico fue proporcionado por la empresa MPI Ltda. (Manufacturas y Procesos Industriales) ubicada en el municipio de Barrancabermeja Santander. El cemento asfáltico estipulado para el trabajo de investigación es un AC 80-100, como se muestra en la Figura 14.

Figura 14. Cemento asfáltico utilizado en la investigación



Fuente. Elaboración propia

Este tipo de cemento asfáltico es seleccionado en el diseño preliminar, debido a los avances que se han desarrollado en el país en este tipo de mezclas mejoradas con grano de caucho reciclado, se definió como zona de estudio la capital del país, además se considera que los resultados tendrán más adaptación.

Por ende, se definió un ligante asfáltico que se ajustará a las condiciones climáticas la zona y al diseño de una capa de rodadura. A continuación, en la Figura 15, se evidencia la localización de la empresa MPI Ltda. quienes de manera cordial y en apoyo de la investigación realizaron el suministro del cemento asfáltico.

Figura 15. Localización planta MPI Ltda.



Fuente. Tomado de Google Earth Pro 2018

2.2.1 Ensayos caracterización cemento asfáltico. El ligante asfáltico debe ser sometido a diferentes ensayos de laboratorio estandarizados en la norma INVIAS sección 700, y así mismo en base a las especificaciones del IDU, establecer el posible uso del cemento asfáltico AC 80-100 en la mezcla asfáltica MD-12²⁸.

Para la caracterización del cemento asfáltico se debe evaluar el comportamiento del mismo en diferentes ensayos de laboratorio, los requerimientos que debe cumplir el ligante asfáltico se encuentran enmarcados en las especificaciones IDU sección 200-11, tabla 200.1. En la Tabla 14 se muestran los diferentes ensayos realizados en el laboratorio al cemento asfáltico AC 80-100, para así poder realizar la comparación con las especificaciones IDU y determinar si el cemento asfáltico empleado cumple las especificaciones correspondientes.

Tabla 14. Resultados obtenidos caracterización del cemento asfáltico.

CARACTERIZACIÓN DE CEMENTO ASFÁLTICO AC 80-100					
Característica	Norma INV.E-	Mín.	Máx.	Ensayo	Observación
ASFALTO ORIGINAL					
Penetración (0.1 mm)	706-13	80	100	97	CUMPLE
Índice de penetración	724-13	-1.0	+1.0	-0.76	CUMPLE
Viscosidad a 60 °C (Pa*s)	717-13	100	200	131	CUMPLE
Punto de ablandamiento (°C)	712-13	42	52	45.4	CUMPLE
Ductilidad (cm)	702-13	100	-	>120	CUMPLE
Punto de ignición Copa abierta de Cleveland (°C)	709-13	232	-	294	CUMPLE
ASFALTO RESIDUAL – Envejecimiento lamina delgada rotatoria INV.E - 720-13					
Pérdida de masa por calentamiento (%)	720-13	-	1	0.3	CUMPLE
Penetración del residuo como porcentaje de la penetración original (%)	721-13	50	-	56.1	CUMPLE
Incremento del punto de ablandamiento (°C)	712-13	-	9	7.2	CUMPLE
Índice de envejecimiento-viscosidad a 60 °C	717-13	-	5	3.2	CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

Nota: en el Anexo B se encuentran los respectivos formatos diligenciados para cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio.

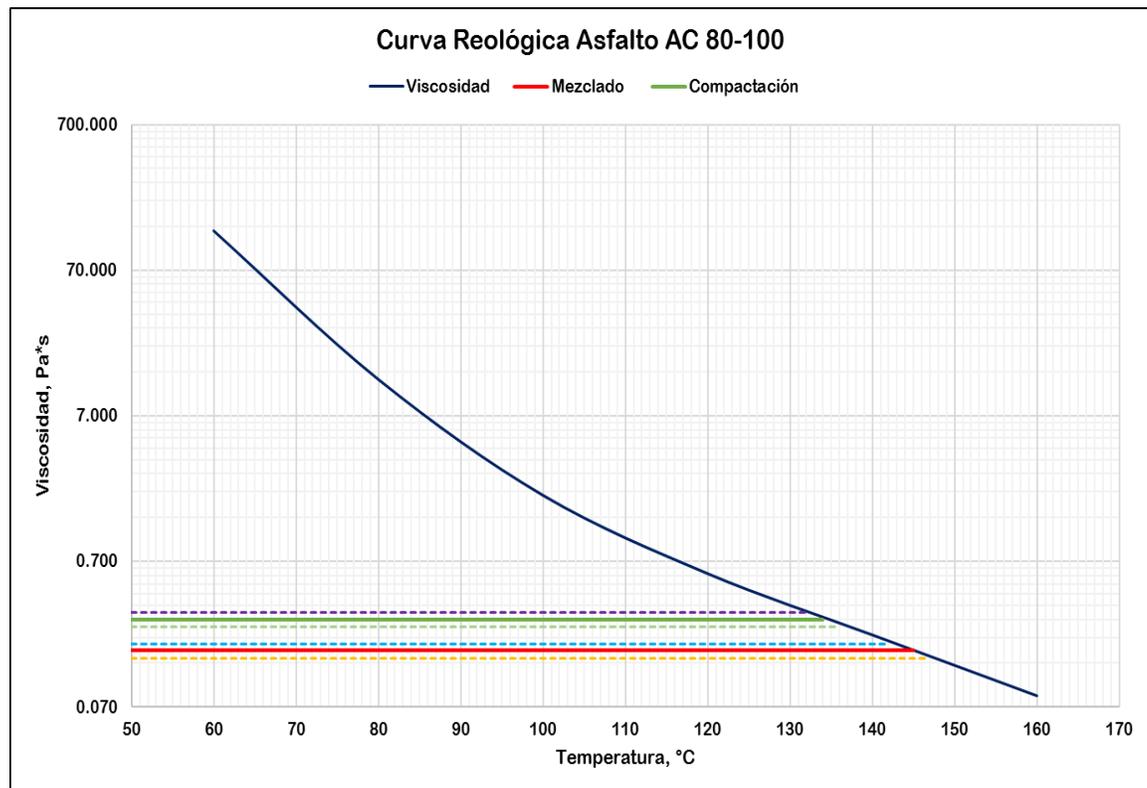
²⁸ Especificaciones Generales de Construcción IDU-2011. Bogotá D.C Capítulo 5. Revestimientos Asfálticos. Sección 510-11. Mezclas asfálticas en caliente densas, Semidensas, gruesas y de alto módulo. P. 11-12.

En la Tabla 14, se puede determinar que el cemento asfáltico seleccionado para la fabricación de las mezclas cumple con los requisitos de la especificación IDU sección 510-11, para un AC 80-10, teniendo así que los materiales obtenidos se podrán utilizar sin ningún inconveniente para el desarrollo normal de la investigación. Se puede observar que el índice de penetración del cemento asfáltico se encuentra dentro del rango establecido para ser denominado un AC 80-100.

2.2.1.1 Viscosidad del cemento asfáltico. La resistencia del líquido a fluir o la Viscosidad, determinado a 60 °C obtenida en el ensayo de laboratorio se encuentra dentro de los límites establecidos, este ensayo se considera importante ya que al realizar el mismo procedimiento a diferentes temperaturas nos permite obtener la curva reológica, necesaria para la determinación de la temperatura de mezclado (viscosidad de 0.17 ± 0.02 Pa*s) y a su vez la temperatura a la cual se debe realizar la compactación (viscosidad de 0.28 ± 0.03 Pa*s).

A partir del ensayo de determinación de la viscosidad empleando el viscosímetro rotacional Brookfield se obtiene la curva reológica para el cemento asfáltico AC 80-100 utilizado en el trabajo de investigación, la cual se presenta a continuación en la Gráfica 4.

Gráfica 4. Curva reológica cemento asfáltico AC 80-100.



Fuente. Elaboración propia

De esta curva reológica del cemento asfáltico **AC 80-100** la cual relaciona la viscosidad expresada en unidades de Pa*s y la temperatura de ensayo, se obtuvieron las temperaturas necesarias para la fabricación de la mezcla, las cuales se presentan en la Tabla 15.

Tabla 15. Temperaturas de mezclado y compactación

Cemento asfáltico	Temperatura de mezclado (°C)	Temperatura de compactación (°C)
AC 80-100	145	134

Fuente. Elaboración propia

Estos valores de temperatura se consideran esenciales a la hora de la fabricación y compactación de la mezcla asfáltica, el cemento asfáltico debe tener una viscosidad óptima para que los agregados queden cubiertos apropiadamente, así mismo se debe obtener una mezcla asfáltica con adecuada trabajabilidad y garantizar la densidad deseada en el diseño de la mezcla asfáltica.

2.3 CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO

Se ha planteado el uso del GCR como sustitución de una fracción del agregado fino de la mezcla asfáltica (método vía seca), el cual consiste en mezclar el Grano de Caucho GCR junto con los agregados, es decir este actuaría como reemplazo de una fracción o porcentaje de los agregados empleados en la fabricación de la mezcla asfáltica. De acuerdo con la revisión literaria realizada, se han desarrollado diversas investigaciones en las cuales se estima que la proporción de GCR debería estar entre el 1% y 3% del peso total de los agregados.

El grano de caucho reciclado fue suministrado por la empresa RECICLAIR SAS. quienes de manera atenta mostraron el apoyo por la investigación, para así poder establecer el posible uso del grano de caucho reciclado en mezclas asfálticas, realizando la adición mediante vía seca. El Grano de Caucho Reciclado suministrado por la empresa Recicclair se muestra en la Figura 16.

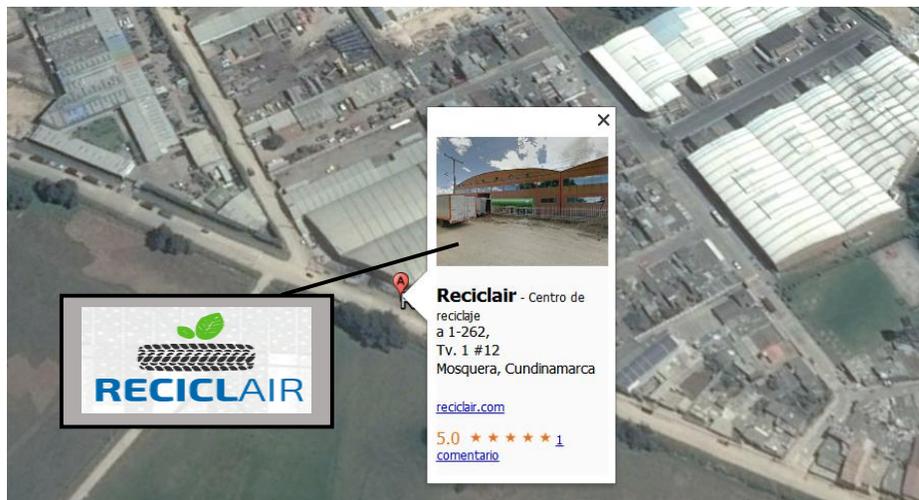
Figura 16. Grano de Caucho Reciclado suministrado por Reciclair SAS.



Fuente. Elaboración propia

RECICLAIR SAS produce hasta 20 mallas de partículas de caucho para los diferentes campos de aplicación del grano de caucho en el reciclaje, estos tamaños de partículas pueden tener diversos usos como: adoquines, asfalto, superficies de deportes, aislante de sonido y vibración entre otros. En la Figura 17 se muestra la localización de la empresa RECICLAIR SAS, con sede principal en el municipio de Mosquera Cundinamarca.

Figura 17. Localización planta Reciclair SAS.



Fuente: Tomado de Google Earth Pro 2018.

En la planta RECICLAIR SAS se pudo observar el área de almacenaje y el proceso de cribaje de algunos de los tamaños más grandes que se producen. Este tipo de empresas en Colombia aún están iniciando y no se han desarrollado prácticas para la obtención del grano de caucho de reciclado de manera masiva, en esta visita la empresa no permitió el acceso a todas las zonas de la planta con lo cual se quería

obtener un conocimiento más profundo del proceso que se realiza para la obtención del grano de caucho reciclado en sus diferentes tamaños, en la Figura 18 se observa el manejo que se le da a los neumáticos fuera de uso, para luego pasar al proceso de trituración.

Figura 18. Almacenamiento Llantas Reciclaire S.A.S.



Fuente. Elaboración propia

2.3.1 Caracterización grano de caucho reciclado. El material es suministrado en unos tamaños indicados por la planta de fabricación, así que la caracterización del grano de caucho reciclado consistió en verificar que los tamaños fueran correctos, además se vio como necesario la determinación del peso específico del material.

2.3.1.1 Granulometría grano de caucho reciclado. Para la incorporación del grano de caucho en la mezcla asfáltico como agregado fino, se realizó un análisis granulométrico del material suministrado en planta obteniendo así diferentes tamaños de grano de caucho reciclado, como muestra en la Tabla 16.

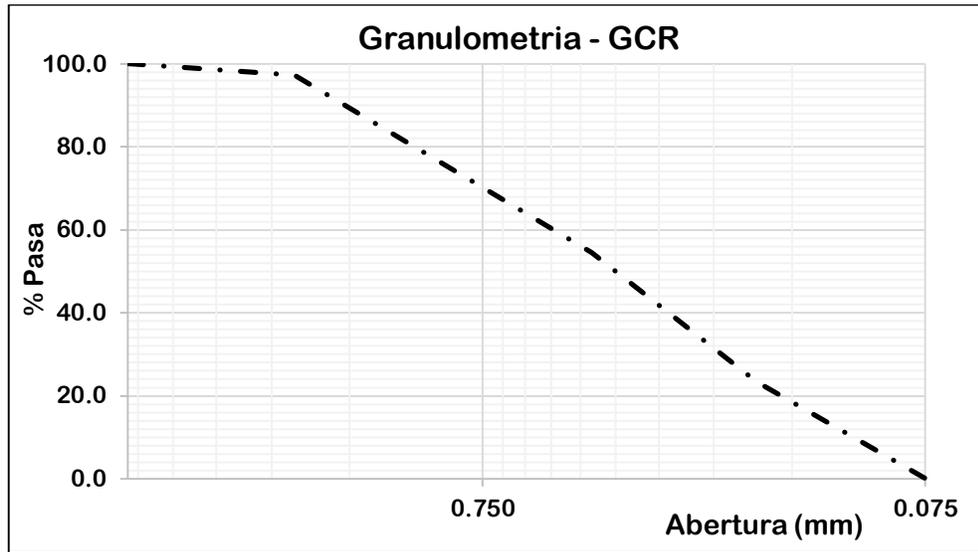
Tabla 16. Granulometría Grano de Caucho Reciclado.

Granulometría GCR		
Tamiz N°	Abertura (mm)	Porcentaje Pasa (%)
4	4.750	100.0
10	2.000	97.3
40	0.425	54.5
80	0.180	23.4
200	0.075	0.1

Fuente. Elaboración propia

De la granulometría realizada al grano de caucho reciclado se puede establecer mayor cantidad de material de gradación media a fino, del cual se considera tomar en el trabajo de investigación, para la adición en la mezcla asfáltica los tamices N°10, N°40 y N°80. La gradación del material se puede observar de mejor manera la curva granulométrica del grano de caucho reciclado, como se muestra en la Gráfica 5.

Gráfica 5. Curva granulométrica grano de caucho reciclado



Fuente. Elaboración propia

El grano de caucho reciclado obtenido al realizar el proceso de tamizado se puede observar en la Figura 19. Este procedimiento se desarrolló para tener facilidad o simplificar el proceso al momento de adicionarlo a las mezclas asfálticas definidas para el análisis de su efecto en una MD-12. Dichos tamaños se observan en la siguiente figura.

Figura 19. Granulometría grano de caucho reciclado.



Fuente. Elaboración propia

Con el fin de realizar una inspección visual de las propiedades físicas para cada uno de los tamaños de adición de GCR en la mezcla asfáltica mediante vía seca se presenta la Figura 20, en la cual se muestra las propiedades físicas características del GCR.

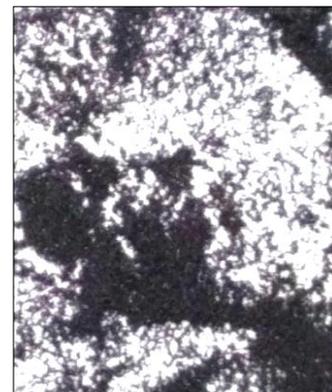
Figura 20. Tamaños de GCR a adicionar mediante vía seca.



%GCR Pasa Tamiz N°10



%GCR Pasa Tamiz N°40



%GCR Pasa Tamiz N°80

Fuente. Elaboración propia

El grano de caucho reciclado que pasa tamiz N°10 se considera como partículas relativamente gruesas el cual presenta características angulosas con bordes agudos y caras planas, además se determinó como un material con consistencia blanda por su facilidad de penetrar su estructura.

De igual manera el GCR de tamaño pasa tamiz N°40 presenta características de material fino con partículas sub-angulosa ya que se observa algunos bordes redondeados con una consistencia blanda. El material de GCR con tamaño que pasa tamiz N°80 se puede describir como un polvillo producto de la trituración, sus partículas se consideran redondeadas y blandas este tamaño es de difícil manipulación ya que presenta tamaño muy fino.

2.3.1.2 Gravedad específica del grano de caucho reciclado. Para el desarrollo de la metodología Marshall es necesario conocer los valores de gravedad específica de los materiales, por esto se realizó la determinación de la gravedad específica del grano de caucho reciclado, analizando si este valor se asemeja a los valores tomados en otros estudios que incluyen este material. Una vez realizado el ensayo de gravedad específica, trabajando el grano de caucho según la norma de ensayo para materiales finos, en la Tabla 17 se presenta el resultado obtenido.

Tabla 17. Gravedad específica grano de caucho reciclado

Material	Gravedad Específica
Grano de Caucho Reciclado - GCR	0.5

Fuente. Elaboración propia

3. DISEÑO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO MD – 12

Una vez desarrollada la etapa de caracterización de los materiales a emplear en la mezcla asfáltica, tales como: agregados pétreos, cemento asfáltico y grano de caucho reciclado, además de verificar el cumplimiento satisfactorio de los requisitos exigidos en las especificaciones generales de construcción del IDU-2011, se procede a llevar a cabo la etapa fundamental en el presente trabajo de investigación la cual consiste en dar desarrollo al diseño de las mezclas asfálticas que serán objeto de análisis.

Para esta etapa anteriormente se ha definido un diseño experimental, el cual consiste en plantear un orden de trabajo y en el cual se ven reflejadas las mezclas que se diseñaran, de acuerdo con esto en la Tabla 18 se muestran las cuatro mezclas que se diseñaran, destacando que la primera de ellas será la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional la cual servirá de referencia para observar los efectos que tiene el grano de caucho adicionado por vía seca en el comportamiento y propiedades de la mezcla asfáltica.

Tabla 18. Diagrama experimental diseño MD-12 con GCR

Materiales			Mezclas
Agregado (A)	Asfalto (B)	Grano de Caucho (C)	
A1	B1	C +0%	A1 B1 C +0%
		C +0.5 %	A1 B1 C +0.5 %
		C +1.5 %	A1 B1 C +1.5 %
		C +2.5 %	A1 B1 C +2.5 %

Fuente. Elaboración propia

De igual manera se tienen las otras tres mezclas de análisis, las cuales de igual manera son tipo MD-12 pero ahora con una variación en cuanto a su contenido de agregado, debido a que la adición de grano de caucho reciclado se trabajara en los porcentajes de 0.5%, 1.5% y 2.5% por el método de adición por vía seca, es decir reemplazando una fracción de agregado fino correspondiente a las fracciones pasa N° 10, N° 40 y N° 80.

3.1 DISEÑO PRELIMINAR MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CONVENCIONAL

Para el diseño preliminar de una mezcla asfáltica se deben seguir una serie de procedimientos basados en este caso en las normas de ensayo definidas por el INVIAS, a continuación, se describirán cada uno de los pasos que se realizaron en la fabricación y compactación de la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional.

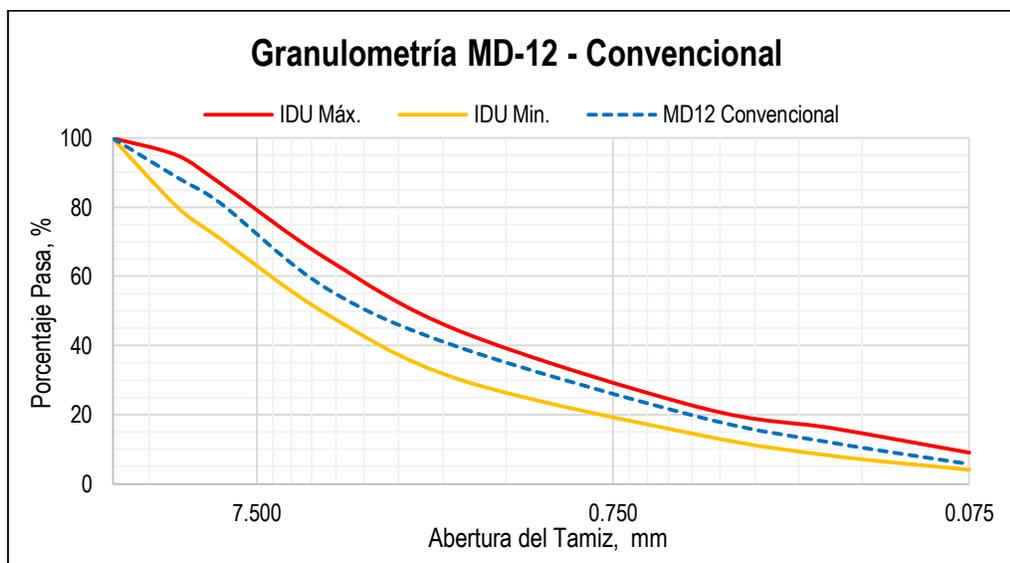
3.1.1 Definición de la granulometría mezcla asfáltica convencional. Esta granulometría se determinó desde la definición del tipo de mezcla asfáltica a diseñar, en este caso la MD-12 según las especificaciones técnicas de construcción del IDU, la cual brinda los límites superior e inferior de las franjas granulométricas (ver Tabla 19), la granulometría de los agregados se obtuvo de la dosificación de los materiales disponibles, obteniendo un ajuste adecuado a la franja especificada como se observa en la Gráfica 6.

Tabla 19. Franja granulométrica MD 12

Mezcla MD-12		Tamiz (U.S. Standard / mm)							
		3/4" (19.00)	1/2" (12.50)	3/8" (9.50)	N°4 (4.75)	N°10 (2.00)	N°40 (0.425)	N°80 (0.180)	N°200 (0.075)
% Pasa	Min.	100	80	71	49	30	14	8	4
	Max.	100	95	87	65	44	22	16	9
	Tol.	-	± 4%			± 3%			± 2%

Fuente. Especificaciones Técnicas Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), sección 510-11 mezclas asfálticas en caliente densas.

Gráfica 6. Curva granulométrica mezcla asfáltica convencional MD-12.



Fuente. Elaboración propia

A partir de la definición de la granulometría se puede empezar a trabajar con la fabricación de la mezcla, para esta etapa se tuvo como guía la norma de ensayo INV. E-748-13 la cual en su sección 5 define el procedimiento a seguir, el cual se describirá a continuación.

3.1.2 Preparación del material mezcla asfáltica convencional. Según lo indicado en la norma de ensayo INV. E-748-13 para desarrollar adecuadamente un diseño de mezcla asfáltica por el método Marshall será necesario elaborar un juego de mínimo 15 briquetas de las cuales 3 corresponderán a cada uno de los porcentajes de asfalto definidos (5 puntos de contenido de asfalto).

Para definir los valores de contenido de asfalto la norma indica que deben variarse cada 0.5% y el punto inicial se puede definir teniendo como guía el requerimiento del porcentaje de vacíos con aire, en este caso la especificación INVIAS indica un porcentaje de vacíos entre 3% y 5%, por lo cual se trabajara el diseño con valores de asfalto entre 4% y 6% como ya se mencionó con aumentos del 0.5% para cada juego de briquetas.

Para realizar el diseño se debe tener claridad en la cantidad de material, en este caso se trabajaron briquetas de 1200 gramos incluido el asfalto, el cual se adicionará como un porcentaje de esta masa total. De igual manera se deben realizar ensayos para determinar la gravedad específica máxima por medio del ensayo RICE, para este la cantidad de material será de 2000 gramos, los pesos de cada una de las fracciones se calcularán en base a la dosificación definida en la granulometría de la mezcla asfáltica.

En la Figura 21 se muestra como se realizó el proceso de preparación y de igual manera se presenta la disposición del mismo antes de proceder a la etapa de mezclado. Luego de tener el agregado debidamente pesado según las fracciones granulométrica se procede a llevarlo a una temperatura definida que no exceda en más de 28°C la temperatura de mezclado obtenida en la curva reológica.

Figura 21. Preparación material mezclas asfáltica convencional MD-12



Fuente. Elaboración propia

3.1.3 Proceso de mezclado mezcla asfáltica convencional. Una vez se tengan los agregados dispuestos en el horno para alcanzar una temperatura de entre 170°C y 175°C, se procede a llevar a la estufa el asfalto, se debe procurar que ambos materiales vayan alcanzando la temperatura a la par, para esto se debe tener un buen control sobre el calentamiento de los mismos, ya que un sobrecalentamiento provocara la pérdida de las propiedades de cada material, especialmente en el asfalto.

El cemento asfáltico deberá alcanzar una temperatura entre 142°C y 147°C, valores obtenidos de la curva granulométrica para el proceso de mezclado. Una vez tanto agregados como asfalto alcancen las temperaturas respectivas, se procede a realizar el proceso de mezclado el cual debe ser lo más rápido posible en un tiempo no mayor a 60 segundos, hasta obtener una mezcla homogénea y evitando la pérdida de material. Durante este proceso es importante mantener el control de la temperatura de mezclado, para garantizar una adecuada compactación y así evitar posibles errores.

3.1.4 Proceso de compactación mezcla asfáltica convencional. Para llevar a cabo el proceso de compactación es necesario tener preparados los moldes para las briquetas, estos se deben armar en su conjunto y llevar al horno a una temperatura aproximadamente de 110°C esto para evitar bruscos cambios de temperatura al depositar la mezcla asfáltica en este.

La mezcla asfáltica se deposita en el molde habiendo colocado papel filtro en el fondo, se aplican 25 golpes con una varilla para distribuir y acomodar la mezcla, así se obtendrá una mejor compactación, se mantiene el control de temperatura y se monta el molde sobre el martillo de compactación mecánico.

Una vez realizado el montaje se verifica que la temperatura se encuentre en un rango de 132°C a 136°C, la cual corresponde a la temperatura de compactación obtenida en la curva reológica anteriormente determinada mediante el viscosímetro Brookfield. Cuando se tenga la temperatura indicada se aplican 75 golpes por cada una de las caras de la briketa.

En estos procesos de mezclado y compactación es de suma importancia mantener un control estricto sobre la temperatura, debido a que es uno de los factores fundamentales para lograr que las mezclas asfálticas diseñadas presenten un comportamiento óptimo de al evaluar cada una de sus propiedades. Una vez realizado el proceso de compactación de cada una de las briquetas se procede a retirar el collarín y la base de cada una de ellas, para mantenerlas en un lugar a temperatura ambiente como se observa en la Figura 22.

Figura 22. Briquetas Compactadas mezcla asfáltica convencional.



Fuente. Elaboración propia.

Luego de compactar las briquetas estas se dejan almacenadas en un lugar hasta que estén frías, aproximadamente 24 horas para de esta manera proceder a extraerlas de los moldes y poder iniciar con los análisis respectivos del diseño Marshall (análisis de densidad y vacíos, estabilidad y flujo), lo cual se describirá más adelante.

3.2 DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA EN CALIENTE TIPO MD-12 CON ADICIÓN DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO MEDIANTE VÍA SECA

Para la realización del presente proyecto de investigación se plantea la adición de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica como agregado, es decir que la incorporación del grano de caucho reciclado GCR, se realizó mediante el procedimiento por vía seca, proceso que se definió anteriormente en el Capítulo 1 del presente documento.

A su vez la problemática ambiental por la que atraviesa el planeta, da campo para generar soluciones que aporten a la mitigación de la misma, en este caso bajo la utilización del grano de caucho proveniente de neumáticos desechados se busca generar pavimentos de calidad, seguridad y que contribuyan al medio ambiente, en Colombia y en el mundo se han desarrollado una serie de investigaciones en las cuales se han estudiado ciertos valores de referencia, los cuales servirán de guía en el desarrollo de este trabajo, los cuales se muestran a continuación:

Inicialmente un trabajo de investigación de Ingeniería Civil realizado en Santiago de Chile²⁹, en el cual se estudia el comportamiento mecánico de las mezclas asfálticas

²⁹ RAMIREZ, Náyade. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso en seco. Chile. 2006.

a las cuales se les ha incorporado caucho como material granular fino, el cual está enfocado principalmente en el efecto directo sobre la mezcla asfáltica que tiene la variación del tiempo y temperatura de digestión. Para la realización del trabajo en mención, se tomaron como porcentajes de análisis el 0.5%, 1.0% y 1.5% de GCR y además se realizó la mezcla convencional sin adición de GCR con el fin de realizar la comparación entre las diferentes mezclas asfálticas.

De esta manera, se pudo establecer que el parámetro más crítico en la adición de caucho mediante vía seca sobre una mezcla asfáltica, es el tiempo de digestión, determinando así que al aumentar la temperatura de digestión con el tiempo constante se obtienen mejores resultados de las mezclas asfálticas con caucho mediante vía seca, obteniendo como temperatura y tiempo de digestión óptimo los valores de 170°C durante 2 horas respectivamente.

Como parte de un programa de investigación para mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en Bogotá, el IDU y la Universidad de los Andes adelantaron este estudio, con el fin de establecer una metodología para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas con caucho de llantas usadas. Concluyendo que el GCR incrementa la vida útil del pavimento y entre menor sea el tamaño del mismo, los resultados serán mejores. Se ensayaron adiciones de caucho del 1% y 2%.³⁰

Por último, una monografía que tenía como objetivo determinar la viabilidad del uso de caucho reciclado por vía seca en diseño de mezclas asfálticas recogiendo información existente de uso del caucho en la ciudad de Bogotá. Se tiene que los valores adecuados para la adición del grano de caucho están entre el 1% y el 3%.³¹

3.2.1 Porcentajes de GCR a adicionar en la mezcla asfáltica. De las investigaciones anteriores se pudo establecer que las mezclas con bajos porcentajes de grano de caucho reciclado presentan mejor comportamiento en las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica. Por ende, se establece en el diseño preliminar de la mezcla asfáltica tomar porcentajes de **GCR 0.5%, 1.5% y 2.5%**, para así poder establecer el valor que presente los mejores resultados en las propiedades físicas y mecánicas en la mezcla asfáltica de análisis.

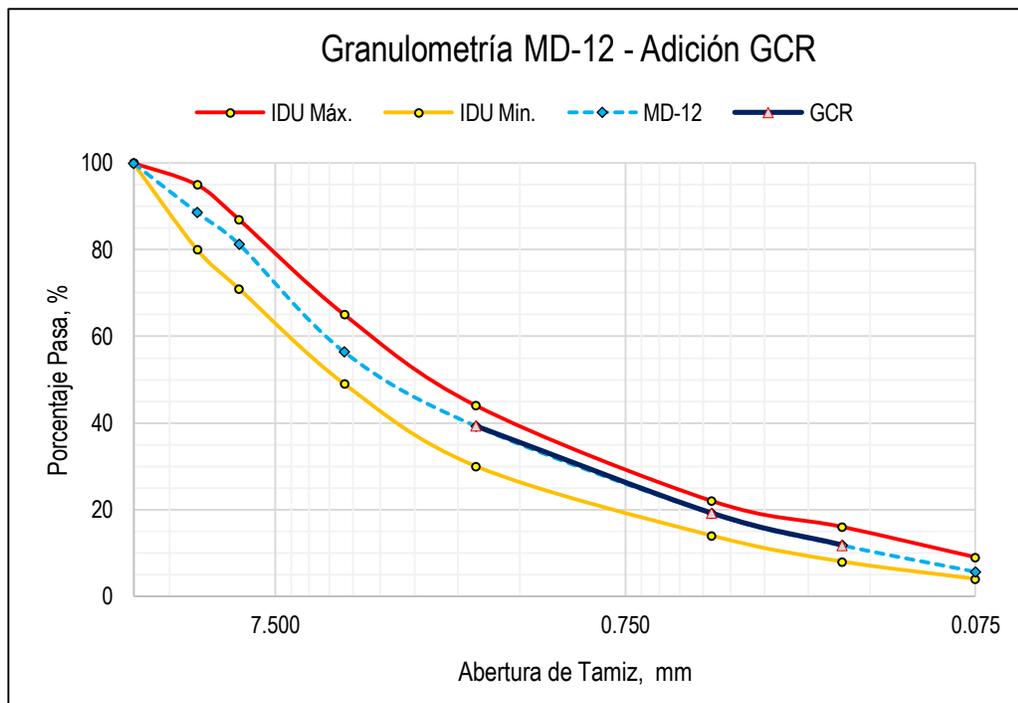
3.2.2 Granulometría mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR mediante vía seca. Como ya se estipuló, la mezcla asfáltica de análisis corresponde a una MD-12, de la cual se realizó el reemplazo del material comprendido en la fracción pasa de los tamices N°10, N°40 y N°80.

³⁰ Estudio de las mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con desechos de llantas. Universidad de los Andes. Bogotá. 2002.

³¹ DUEÑAS, Ana y CALUME Alejandro. Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho reciclado modificado para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá. 2017.

La adición de grano de caucho reciclado se estipuló entre estos tamices ya que este material fue el suministrado por la planta fabricante del GCR, además según las investigaciones mencionadas anteriormente se demuestra mejores resultados en mezclas asfálticas con granos de menor tamaño. La granulometría del grano de caucho reciclado a incorporar en la mezcla asfáltica tipo MD-12, se encuentra dentro de la franja granulométrica y se muestra en la Gráfica 7 la fracción que será reemplazada mediante vía seca.

Gráfica 7. Granulometría MD-12 – Adición de GCR.



Fuente. Elaboración propia.

En la Gráfica 7 se puede observar la granulometría que se empleó de GCR en la adición de la mezcla asfáltica. El GCR a emplear en la mezcla se presenta como la franja continua de color azul, dicho material comprendido en los tamices mencionados anteriormente. Es importante señalar que la selección de la granulometría a emplear en el trabajo es innata de cada investigación, por esto se recomienda realizar más investigaciones variando la granulometría empleada en la mezcla asfáltica.

3.2.3 Preparación del material mezcla asfáltica con adición de GCR. Para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto en las mezclas modificadas con GCR, se debe pesar la cantidad de material de GCR a incorporar en la mezcla asfáltica, de acuerdo a los porcentajes estipulados en el diseño preliminar, como se muestra en la Figura 23.

Figura 23. Proceso de pesado del GCR para la adición mediante vía seca.



Fuente. Elaboración propia.

Para la realización de la metodología Marshall es necesario fabricar 3 briquetas (cada una de 1200 gramos), para cada porcentaje de asfalto. Del peso total de cada briketa se adició los porcentajes estipulados de GCR en la franja estipulada anteriormente.

3.2.4 Aplicación tiempo de digestión GCR a adicionar en la mezcla asfáltica:

El tiempo de digestión corresponde a uno de los aspectos fundamentales en la preparación del GCR para la incorporación en la mezcla asfáltica. Ya que el material debe alcanzar la temperatura óptima y las propiedades físicas adecuadas para la interacción con el agregado y el asfalto.

El tiempo al cuál se debe someter el grano de caucho reciclado a altas temperaturas para obtener las mejores condiciones en el mezclado (tiempo de digestión) es de 2 horas a una temperatura de 170°C. Estos valores de tiempo y temperatura óptimos fueron los utilizados en el presente trabajo de investigación, al aplicar este proceso de digestión se obtiene que el material cambia sus características físicas, evidenciando visualmente que sus partículas se adhieren entre sí por el efecto de la temperatura, como se muestra a continuación en la Figura 24.

Figura 24. Tiempo de digestión Grano de caucho reciclado.



Fuente. Elaboración propia.

3.2.5 Proceso de mezclado mezcla asfáltica con adición de GCR: Para la realización del proceso de mezclado de los diferentes agregados en la mezcla asfáltica modificada con GCR, una vez cumplido el tiempo de digestión, se verificó la temperatura de los agregados pétreos los cuales deben estar en el rango de 142°C a 147°C, una vez obtenida esta temperatura y previamente calentado el asfalto a la temperatura de mezclado, se procede a incorporar cada uno de los materiales que componen la mezcla asfáltica como se muestra en la siguiente Figura 25.

Figura 25. Proceso adición GCR mediante vía seca.



Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 25 se puede observar el proceso de la adición del grano de caucho reciclado como parte de los agregados pétreos. Al realizar la adición de GCR se procede de manera instantánea a la incorporación del asfalto de manera tal que recubra la mayor parte de los agregados.

Al tener todos los materiales incorporados se llevó a cabo el proceso de mezclado, el cual se realizó con ayuda de la mezcladora eléctrica Humboldt, a su vez el operador de manera rápida mezcla los agregados y el asfalto de tal manera que todos los agregados queden totalmente recubiertos de asfalto como se muestra en la Figura 26.

Figura 26. Mezclado y obtención final MD-12 modificada con GCR.



Fuente. Elaboración propia.

3.2.6 Proceso de compactación mezcla asfáltica con adición de GCR: La compactación de los especímenes modificados con GCR se realizó de igual manera que la mezcla convencional, procedimiento descrito anteriormente en el numeral 3.1. El proceso de mezclado y compactación se realizó de la misma manera para todas las briquetas modificadas con grano de caucho reciclado. En la Figura 27 se muestran las briquetas en sus respectivos moldes después de la compactación, y así cumplir el tiempo de curado para posteriormente realizar la extracción de las briquetas.

Figura 27. Briquetas Compactadas con adición de GCR



Fuente. Elaboración propia.

3.3 ANÁLISIS DE DENSIDAD Y VACÍOS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA

Finalizado el proceso de mezclado y compactación, se realizó la extracción de cada una de las briquetas elaboradas para poder continuar con la etapa del análisis de densidad y vacíos, en este procedimiento lo que se busca es determinar la gravedad específica bulk de la mezcla compacta, así como la gravedad específica máxima y quizá uno de las variables más importantes en el diseño de una mezcla como lo es el porcentaje de vacíos con aire.

3.3.1 Gravedad específica bulk, Gmb. Esta gravedad específica bulk hace referencia a la relación entre la masa de un volumen de material y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura de 25°C, esta hace referencia a la mezcla asfáltica compactada teniendo en cuenta los vacíos existentes dentro de la misma, para determinar la Gmb se siguió el procedimiento descrito en la norma de ensayo INV. E-734-13.

El primer paso es registrar la masa de la biqueta una vez esta se haya enfriado, a este valor se le denominara la masa seca al aire. Antes de realizar los respectivos pesos es necesario dimensionar cada una de las briquetas ya que estos valores son necesarios para procedimientos posteriores.

Luego de tener la masa seca al aire es necesario recubrir cada una de las briquetas para sellar la totalidad de sus poros o vacíos permeables, para esto se utilizó un recubrimiento con parafina caliente, simplemente se caliente la parafina y rápidamente se cubre con una delgada capa. Una vez recubierta se registra la masa de la biqueta, la cual se denomina masa en el aire del espécimen recubierto.

Por último, se registra el peso de la biqueta recubierta con parafina, pero esta vez sumergida en agua a una temperatura de 25°C, teniendo así los valores necesarios para la determinación de la gravedad específica bulk de la mezcla asfáltica compactada.

3.3.2 Gravedad específica máxima, Gmm. La gravedad específica máxima hace referencia de igual manera a una relación entre una masa de material sobre la masa de un volumen igual de agua, la temperatura de ensayo igualmente es de 25°C, para realizar la determinación de esta gravedad específica Gmm se seguirá la norma de ensayo INV. E-735-13.

Para determinar la gravedad específica máxima se emplea el denominado ensayo RICE en el cual la mezcla asfáltica se realiza con 2000 gramos de material, se realizó una mezcla de Rice para cada contenido de asfalto trabajado, a diferencia de la gravedad específica bulk, en este procedimiento se utilizará la mezcla asfáltica sin compactar, es decir en estado suelto.

Luego de realizar la mezcla, esta se deja enfriar garantizando que al finalizar esta permanezca en estado suelto, se registra la masa de la muestra seca al aire y en estado suelto, una vez registrado dicho valor se procede a realizar el montaje para el ensayo, el cual consiste en el picnómetro de vacíos y el extractor de vacíos.

Se deposita la mezcla en el picnómetro junto con cierta cantidad de agua y se continúa con el proceso de extracción de vacíos durante aproximadamente 15 minutos, una vez finalizado se registra la masa del picnómetro lleno de agua más la muestra de ensayo, dando por finalizada la determinación de la gravedad específica máxima G_{mm} .

3.3.3 Porcentaje de vacíos con aire, V_a . Los vacíos con aire son esos huecos o poros que se encuentran entre partículas de agregados cubiertos con asfalto en una mezcla asfáltica compactada, este valor es uno de los más utilizados, tal vez el de mayor importancia al desarrollar cualquiera de los métodos de diseño de mezclas asfálticas, de igual manera es un parámetro de gran aplicación para la compactación de las mezclas asfálticas.

Este porcentaje de vacíos se determina siguiendo lo indicado en la norma de ensayo INV. E 736-13, para el caso de mezclas asfálticas densas como es el caso de la presente investigación simplemente consiste en una relación entre la gravedad específica bulk G_{mb} y la gravedad específica máxima G_{mm} determinada anteriormente.

Aquí es importante tener claro un criterio que dice que una mezcla asfáltica densa es aquella en la cual sus vacíos no superan el 10%, en el caso que al realizar el cálculo de esta variable el resultado sea mayor o igual a 10% se deberán volver a realizar el ensayo como verificación o se tiene la posibilidad de rediseñar la mezcla asfáltica debido a que estos valores de vacíos mayores corresponderían a una mezcla asfáltica abierta la cual tiene un tratamiento diferente debido a sus propiedades.

3.4 ESTABILIDAD Y FLUJO MARSHALL

El ensayo de “Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall”, procedimiento descrito en la norma INVIAS INV E 748-13, es necesario para la determinación de las propiedades mecánicas de estabilidad y flujo de las mezclas, valores indispensables para la elección del porcentaje óptimo de asfalto de cada una de las mezclas asfálticas de estudio.

Una vez compactadas las briquetas y cumplido el periodo de reposo, se realiza el proceso de extracción del molde, para posteriormente la elaboración del ensayo. Inicialmente se colocan las briquetas en baño de maría o baño térmico a una temperatura de 60°C durante 30 minutos, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28. Baño de maría ensayo de estabilidad y flujo.



Fuente. Elaboración propia.

Una vez cumplido el tiempo en baño térmico de las briquetas, se seca superficialmente la briqueta a fallar y se coloca en las mordazas previamente calentadas a una temperatura de 20 a 40°C, posteriormente se realiza el montaje en la prensa Marshall ajustando y encerando el dial medidor de deformaciones, en la Figura 29, se muestra el montaje en la prensa Marshall para la determinación de la estabilidad y flujo de cada uno de los especímenes:

Figura 29. Montaje prensa Marshall LSP de la UPTC.



Fuente. Elaboración propia.

Se da inicio al ensayo en la prensa Marshall la cual empieza a aplicar carga a una velocidad de deformación constante de 50 ± 5 mm/min hasta que ocurra la falla. La falla ocurre cuando la carga sobrepasa la máxima soportada por la briqueta por lo que esta empieza a decrecer. Así mismo se registra el valor del flujo como la deformación registrada por el dial de deformaciones en el momento de la falla.

El valor de la estabilidad obtenido en el ensayo deberá ser corregido por un factor que depende del espesor de la briqueta ensayada:

- Para briquetas con espesor mayor a 63.5 mm, el factor aplicado reducirá el valor de la estabilidad obtenido en la prensa Marshall.
- Para briquetas con espesor menor a 63.5 mm, el factor aplicado aumentara el valor de la estabilidad obtenida en la prensa Marshall.

Una vez determinados los valores de estabilidad corregida y flujo se evalúan los valores obtenidos de acuerdo a los criterios establecidos en la sección 510-11 del IDU tabla 510.8 criterios de diseño de la mezcla asfáltica.

Al realizar la evaluación de los criterios establecidos por el IDU, se debe obtener un porcentaje óptimo de asfalto que cumpla todos los requisitos propuestos. Aquellas mezclas que no cumplan los requisitos se les deben realizar modificaciones para así poder mejorar las propiedades que presenten inconvenientes, algunas modificaciones sugeridas se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Alternativas para el mejoramiento en el ensayo Marshall.

	Estabilidad satisfactoria	Estabilidad baja
Vacíos con aire bajos	Reducir el contenido de asfalto o de llenante mineral, o ambos. Modificar la gradación y/o la combinación de los agregados para incrementar los vacíos.	Aumentar llenante mineral, disminuir el contenido de asfalto o ambos simultáneamente. Aumentar la cantidad y/o angulosidad del agregado grueso.
Vacíos con aire satisfactorios	No se requiere ningún ajuste.	Disminuir el contenido de asfalto, aumentar llenante mineral o ambas cosas al mismo tiempo. Aumentar la cantidad y/o angulosidad del agregado grueso.
Vacíos con aire altos	Aumentar el contenido del asfalto y/o el de llenante mineral. Modificar la gradación y/o combinación de los agregados para obtener menos vacíos en los agregados.	

Fuente: PÉREZ BUITRAGO, Gonzalo. Método de diseño de mezclas asfálticas “Método Marshall”. En: Apuntes de clase. 2011.

3.5 VERIFICACIÓN DEL DISEÑO PRELIMINAR DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

Al realizar el diseño preliminar de la mezcla asfáltica se obtendrá una mezcla con un contenido óptimo de asfalto que cumpla con los requisitos definidos por las especificaciones generales de construcción, en este caso las que contempla el IDU, luego de determinar ese porcentaje óptimo de asfalto es necesario realizar una serie de pruebas de tipo mecánico las cuales garantizaran que la mezcla tenga unas propiedades y un comportamiento óptimo, a este proceso se le denomina verificación o comprobación del diseño preliminar de la mezcla asfáltica.

3.5.1 Verificación volumétrica del diseño preliminar. La primera parte de la verificación consiste en una verificación volumétrica, la cual consiste en realizar nuevamente una serie de tres briquetas esta vez con el contenido de asfalto óptimo determinado en el diseño preliminar, lo que se busca con esto es verificar que realmente ese porcentaje óptimo de asfalto cumpla con los requisitos contemplados en las especificaciones del IDU presentadas en la Tabla 21.

Tabla 21. Variables verificación volumétrica del diseño Marshall.

Característica		Mezclas Densas MD – 12
		T2 – T3
<i>Compactación (golpes/cara)</i>		75
<i>Estabilidad mínima (Kg)</i>		750
<i>Flujo (mm)</i>		2 – 4
<i>Vacíos con aire %</i>	Rodadura	3 – 5
<i>Vacíos en Agregados %</i>	Mezclas 12	≥ 15
<i>Vacíos llenos de asfalto %</i>		65 – 78
<i>Relación Llenante/Ligante</i>		0.8 – 1.2
<i>Relación Estabilidad/Flujo</i>		300 – 500
<i>Índice de Película de Asfalto mínima, μm</i>		7.5

Fuente: Especificaciones técnicas Instituto de Desarrollo Urbano. Sección 510.3 diseño de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.

3.5.2 Verificación Índice de película asfáltica, IPA. Este índice hace referencia al espesor promedio de película de ligante en una mezcla asfáltica, expresado en milésimas de milímetro (μm) del asfalto incorporado menos el asfalto que fue absorbido por el agregado en el proceso de mezcla y compactación. Esta verificación se realiza para garantizar que los agregados estén cubiertos por un espesor mínimo de asfalto, lo cual se verá reflejado en la cohesión, durabilidad y resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica.

Para determinar el índice de película de asfalto mínimo se tiene como referencia la norma de ensayo INV. E-741-13 según la cual se utilizan los valores de la granulometría de la mezcla, así como: la gravedad específica del agregado combinado, gravedad específica del asfalto y el contenido de asfalto efectivo en

porcentaje. Inicialmente se calcula la superficie específica del agregado combinado mediante utilizando la Ecuación 15:

$$A = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.30e + 0.60f + 1.60g) * 0.20482$$

(Ec. 15)

Donde,

A, superficie específica del agregado combinado, m²/Kg

a, porcentaje pasa tamiz N° 4

b, porcentaje pasa tamiz N° 8

c, porcentaje pasa tamiz N° 16

d, porcentaje pasa tamiz N° 30

e, porcentaje pasa tamiz N° 50

f, porcentaje pasa tamiz N° 100

g, porcentaje pasa tamiz N° 200

Cabe resaltar que el valor de porcentaje pasa para cada una de las fracciones indicadas son obtenidos de la granulometría con la cual se diseñó y fabricó la mezcla, una vez determinada la superficie específica ya se puede calcular el índice de película asfáltica IPA, con la Ecuación 16:

$$IPA = \frac{P_{be}}{100 - P_b} * \frac{G_{sb}}{2.65 * A} * \frac{10^{-3}}{G_b} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde,

IPA, Índice de película de asfalto, μm

P_{be}, contenido de asfalto efectivo, %

P_b, contenido de asfalto total, %

G_{sb}, Gravedad específica bulk del agregado combinado

A, superficie específica del agregado combinado, m²/Kg

G_b, Gravedad específica del asfalto a 25 °C

Obteniendo de esta manera el valor del espesor de la película de asfalto que cubre los agregados combinados luego de realizado el proceso de mezclado, este valor se deberá comparar con el requisito mínimo contemplado en la especificación.

3.5.3 Verificación de la adherencia de la mezcla asfáltica. La verificación de la adherencia se realiza mediante el ensayo de laboratorio de evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas mediante la prueba de tracción indirecta aplicando la norma de ensayo INV. E-725-13, por la cual se busca medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta, de igual manera permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas asfálticas. Siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

Una vez definido el contenido de asfalto óptimo en el diseño preliminar se procede a realizar un ensayo de Rice obteniendo de esta manera la gravedad específica máxima medida, de igual manera es necesario elaborar una serie de mínimo seis briquetas, de las cuales tres serán ensayadas en condición seca y las tres briquetas restantes se ensayarán luego de un proceso de saturación.

El grupo de briquetas para el ensayo en condición húmeda se dispone en un baño maría a 60°C durante 24 horas sumergidos totalmente, pasado este periodo de tiempo se acondicionan a una nueva temperatura esta vez de 25°C. Tanto los especímenes del grupo seco, como del grupo húmedo se deberán fallar luego de permanecer por un tiempo determinado en un baño de agua a 25°C. El grupo húmedo deberá permanecer una hora en el baño, mientras que el grupo seco tan solo durará 20 minutos a 25°C.

Ambos grupos se someterán a una carga empleando la prensa Marshall empleando el montaje mostrado en la Figura 30, esta carga se aplicará a una velocidad de deformación de 2"/min hasta alcanzar la carga máxima la cual deberá ser registrada, luego se continua la aplicación de carga hasta fracturar la briqueeta con el fin de estimar visualmente el daño que causa la humedad a la mezcla.

Figura 30. Montaje ensayo de tracción indirecta.



Fuente. Elaboración propia.

Con los valores de carga máxima registrados, se calcula la resistencia a la tracción indirecta promedio, a partir de los resultados de resistencia retenida se deberá verificar que el grupo de probetas sometidas a tracción en condición húmeda deberá alcanzar mínimo el 80% del valor promedio de resistencia a tensión alcanzado por las probetas ensayadas en condición seca. Si no se alcanza este valor, se deberá incrementar la adhesividad lo recomendable es emplear un aditivo mejorador de adherencia apropiado y/o llenante mineral especial.

3.6 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO USANDO EL PÉNDULO BRITÁNICO

La medida de las propiedades superficiales de fricción en el pavimento se determina según lo indicado en la norma de ensayo INV E 792-13, esta norma describe el procedimiento de ensayo haciendo uso del péndulo británico, para la obtención de los valores de Coeficiente de Resistencia al Deslizamiento. En la Figura 31 se evidencia el equipo de Laboratorio denominado péndulo británico, necesario para la determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento.

Figura 31. Péndulo Británico, usado para la determinación del CRD.



Fuente. Elaboración propia.

Para la realización del ensayo se estipula dos condiciones de análisis del pavimento en estado húmedo y seco. Es importante señalar que a la hora de la realización del ensayo en estado húmedo toda la superficie de la briqueta debe estar cubierta de agua, y para el estado seco la superficie de ensayo debe estar totalmente seca para la correcta elaboración del ensayo.

Para la realización del ensayo se elaboraron briquetas de 6 pulgadas de diámetro y 2 pulgadas de altura, las dimensiones de las briquetas no son estipuladas en la norma de ensayo, la cual establece que se debe garantizar una longitud adecuada de rozamiento entre la zapata y la superficie de ensayo. La norma de ensayo sugiere tomar mínimo cuatro valores de fricción los cuales no deben variar en una unidad CRD.

El criterio de aceptación de la medida de resistencia al deslizamiento es tomado en la norma de ensayo Invias, ya que para el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), no

es tenido en cuenta como especificación para mezclas asfálticas. En la sección 450-13 de las especificaciones Invias se estipula un valor mínimo de 0.5 CRD para mezclas asfálticas usadas como capas de rodadura. Por lo que se considera tomar este valor establecido por el Invias para posteriormente tener un criterio de aceptación de resistencia al deslizamiento para las diferentes mezclas asfálticas de estudio.

3.7 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA O AHUELLAMIENTO DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA

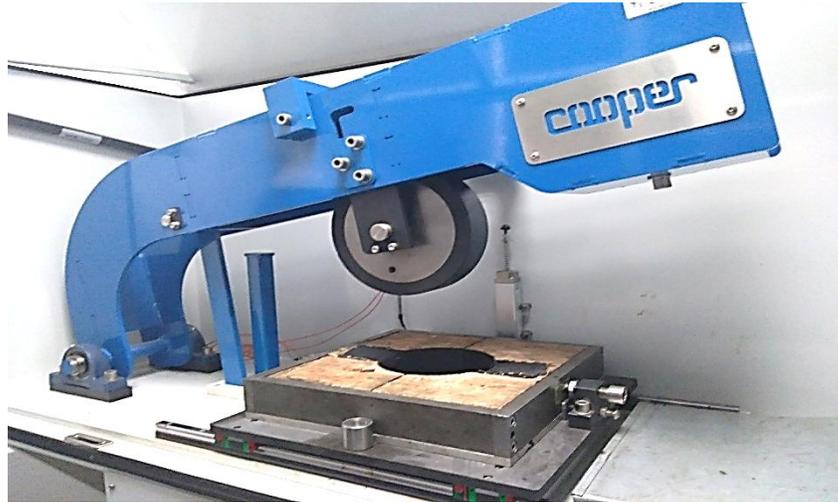
El método para evaluar o determinar la resistencia a la deformación permanente o ahuellamiento de una mezcla asfáltica en laboratorio se lleva a cabo empleando el equipo Wheel Tracker o pista de ensayo de laboratorio, en Colombia esta prueba se ejecuta según lo establecido en la norma de ensayo INV. E-756-13 y consiste básicamente en someter una briqueta de dimensiones definidas al paso de una rueda en condiciones de presión y temperatura controladas.

La realización de este ensayo brinda una idea de las fallas que pueden llegar a ocurrir en el pavimento, las cuales pueden estar asociadas a aplicaciones de carga de tránsito, tales como agrietamiento y acumulación de deformaciones verticales permanentes. La realización de este ensayo como parte de la verificación del diseño de la mezcla asfáltica solo se exige obligatoriamente para los niveles de tránsito T4 y T5, así como para las mezclas de alto módulo.

La ejecución del ensayo consiste en la fabricación de una briqueta de dimensiones establecidas según las condiciones de laboratorio, siempre que se controlen parámetros como espesores y fijación adecuada de la probeta, para esta prueba deberán fabricarse mínimo tres probetas para cada variable que se busque analizar, la cantidad de material se obtiene a partir de los valores de densidad bulk obtenida del diseño Marshall y del volumen geométrico del molde de ensayo.

Las probetas se deberán acondicionar a 60°C en un horno durante mínimo cuatro horas antes de ejecutar el ensayo, pasadas dos horas se procede a acondicionar la temperatura de la cámara de la pista, esta de igual manera deberá ser de 60°C. Transcurrido este tiempo se dispone la probeta en el montaje respectivo mostrado en la Figura 32 y se permite un tiempo adicional para estabilizar la temperatura de ensayo.

Figura 32. Wheel Tracker, usado para la determinación del ahuellamiento.



Fuente. Elaboración propia.

Una vez se alcance la temperatura de ensayo de 60°C se pone en funcionamiento el equipo de pista con el paso de la llanta con una presión de contacto de 9 Kg/cm² (según la norma de ensayo) durante un periodo sin interrupciones de 120 minutos, en los cuales se deberán registrar lecturas de deformaciones verticales en los siguientes tiempos: 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos, para posteriormente realizar la curva de deformación de la mezcla asfáltica y determinar la velocidad de deformación media correspondiente al intervalo de tiempo de 105 a 120 minutos.

4. RESULTADOS DISEÑO MEZCLA ASFÁLTICA TIPO MD-12

Realizado todo el proceso de diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 en laboratorio, en el presente capítulo se dan a conocer cada uno de los resultados obtenidos al aplicar la metodología Marshall en el diseño preliminar, así como la verificación de las mezclas asfálticas fabricadas con el contenido óptimo de asfalto determinado para de esta manera definir la fórmula de trabajo para cada una de las mezclas asfálticas diseñadas con adición de grano de caucho reciclado y convencional.

En el desarrollo del diseño Marshall se ven involucradas una serie de variable gravimétricas, volumétricas, entre otras, las cuales se encontrarán recolectadas en el presente capítulo, debido a esto se considera conveniente definir una nomenclatura adecuada para la identificación de cada una de las mencionadas variables, la cual se presenta a continuación en la Tabla 22:

Tabla 22. Nomenclatura diseño método Marshall

Nomenclatura		Descripción
Datos generales	%Asf.	<i>Porcentaje de asfalto añadido a la mezcla</i>
	h	<i>Altura de la briqueta</i>
	Fc	<i>Factor de corrección por espesor para la Estabilidad</i>
Pesos de las briquetas	Seca	<i>Peso de la briqueta seca al aire</i>
	Paraf.	<i>Peso de la briqueta recubierta con parafina</i>
	Sumg.	<i>Peso de la briqueta con parafina sumergida</i>
Gravedades Específicas	G_{mb}	<i>Gravedad específica bulk de la mezcla compacta</i>
	G_{mm}	<i>Gravedad específica máxima (Método RICE)</i>
	G_{se}	<i>Gravedad específica efectiva del agregado</i>
Composición volumétrica	V_{sb}	<i>Volumen de agregados en la mezcla asfáltica</i>
	V_{GCR}	<i>Volumen de grano de caucho en la mezcla asfáltica</i>
	V_a	<i>Volumen de vacíos con aire en la mezcla asfáltica</i>
	V_{be}	<i>Volumen de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica</i>
Variables Marshall	A_a	<i>Volumen de Asfalto absorbido</i>
	VAM	<i>Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral</i>
	VFA	<i>Porcentaje de Vacíos llenos de asfalto</i>
	P_{be}	<i>Contenido de asfalto efectivo</i>
	RP	<i>Relación llenante ligante o relación llenante/ligante</i>
	E/F	<i>Relación estabilidad/flujo</i>

Fuente. Elaboración propia

Teniendo claridad en la nomenclatura que se empleará de ahora en adelante, se procede a presentar los resultados del diseño preliminar cada una de las mezclas asfálticas de análisis, así como los resultados de la verificación y fórmula de trabajo de cada una de ellas.

4.1 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CONVENCIONAL

Inicialmente se trabajó con la mezcla asfáltica que servirá como punto de referencia para realizar las respectivas comparaciones relacionadas con el efecto del grano de caucho reciclado, es decir la mezcla asfáltica MD-12 convencional, la cual se realizara de acuerdo a los parámetros definidos por las especificaciones generales de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano IDU.

4.1.1 Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD-12 convencional. En esta parte se reúnen los resultados obtenidos luego de realizar el diseño preliminar de la mezcla asfáltica, en este caso la primera de ellas que es la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional, es decir, sin ningún tipo de adición de grano de caucho reciclado, esta es la mezcla que servirá de referencia para hacer los análisis comparativos a los que haya lugar.

Inicialmente se tienen unos datos de entrada correspondientes a las propiedades gravimétricas de los materiales involucrados en el diseño preliminar, a continuación, en la Tabla 23 se presentan los valores mencionados.

Tabla 23. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 Convencional

Material	Gravedad Especifica, G_i	Proporción, %	
Grava	G_G	2.597	43.6
Finos	G_F	2.654	50.7
Filler	$G_{Pasa200}$	2.548	5.7
GCR	G_{GCR}	0.5	0.0
Asfalto	G_b	1.014	-
Parafina	G_p	0.92	-
Agregados	G_{sb}	2.623	-

Fuente. Elaboración propia

Luego de realizar todo el proceso de mezclado y compactación de la mezcla en laboratorio en laboratorio, junto con los datos indicados en la tabla anterior se realizan los cálculos pertinentes al diseño preliminar de la mezcla asfáltica convencional, con los cuales se procede a definir el contenido óptimo de asfalto.

En la Tabla 24 se evidencian los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla asfáltica convencional siguiendo la metodología Marshall, en esta se observan valores gravimétricos, composición volumétrica y otros como la estabilidad y el flujo.

Tabla 24. Resultados Ensayo Marshall Mezcla Convencional

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL				Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)		
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc			Corregida	
4	63.13	1200	1202	691	2.169	A	1993.10	2.631	79.37	0.00	5.68	14.95	0.24	20.63	72.48	3.8	1.51	1167.5	1.011	1180.4	1.68	666.7
	64.13	1199	1201	690	2.167	B	7069.80											1093.6	0.985	1077.2	1.80	
	63.47	1200	1202	691	2.169	C	8256.90											1142.6	1.003	1146.0	1.63	
					2.168		2.473														1134.5	
4.5	63.78	1201	1203	692	2.171	A	1916.20	2.628	79.09	0.00	5.26	15.65	0.15	20.91	74.85	4.4	1.31	1245.1	0.995	1238.9	2.31	574.8
	63.85	1204	1206	695	2.176	B	7069.80											1275.5	0.993	1267.1	2.24	
	63.87	1200	1202	691	2.169	C	8204.55											1298.6	0.993	1290.1	2.06	
					2.172		2.452														1265.4	
5	63.29	1202	1204	693	2.173	A	2044.60	2.618	78.75	0.00	4.78	16.48	0.15	21.25	77.52	4.9	1.17	1358.5	1.008	1369.4	2.79	522.8
	63.21	1203	1205	694	2.174	B	7069.80											1449.7	1.008	1461.3	2.67	
	63.34	1201	1203	693	2.175	C	8271.60											1437.9	1.005	1445.1	2.72	
					2.174		2.426														1425.2	
5.5	64.02	1200	1201	689	2.160	A	1965.40	2.621	78.03	0.00	4.70	17.27	0.05	21.97	78.62	5.5	1.04	1382.1	0.988	1365.5	2.95	470.0
	63.95	1204	1206	694	2.172	B	7069.80											1426.5	0.980	1398.0	2.82	
	63.98	1200	1202	690	2.165	C	8219.99											1346.3	0.980	1319.3	2.92	
					2.166		2.411														1361.0	
6	63.46	1200	1202	690	2.165	A	1960.50	2.620	77.53	0.00	4.43	18.04	0.08	22.47	80.29	5.9	0.96	1114.0	1.003	1117.4	2.95	378.2
	63.47	1201	1203	691	2.167	B	7069.80											1090.4	1.003	1093.7	3.02	
	63.49	1199	1201	688	2.159	C	8210.87											1138.1	1.003	1141.5	2.90	
					2.163		2.393														1117.5	

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en el diseño preliminar se realiza un resumen de las variables involucradas en la definición del porcentaje o contenido óptimo de asfalto según los criterios del Instituto Nacional de Vías en sus especificaciones generales de construcción del 2013. En la Tabla 25 se presentan los valores para cada uno de los porcentajes de asfalto trabajados en laboratorio.

Tabla 25. Resumen Diseño Marshall MD-12 Convencional

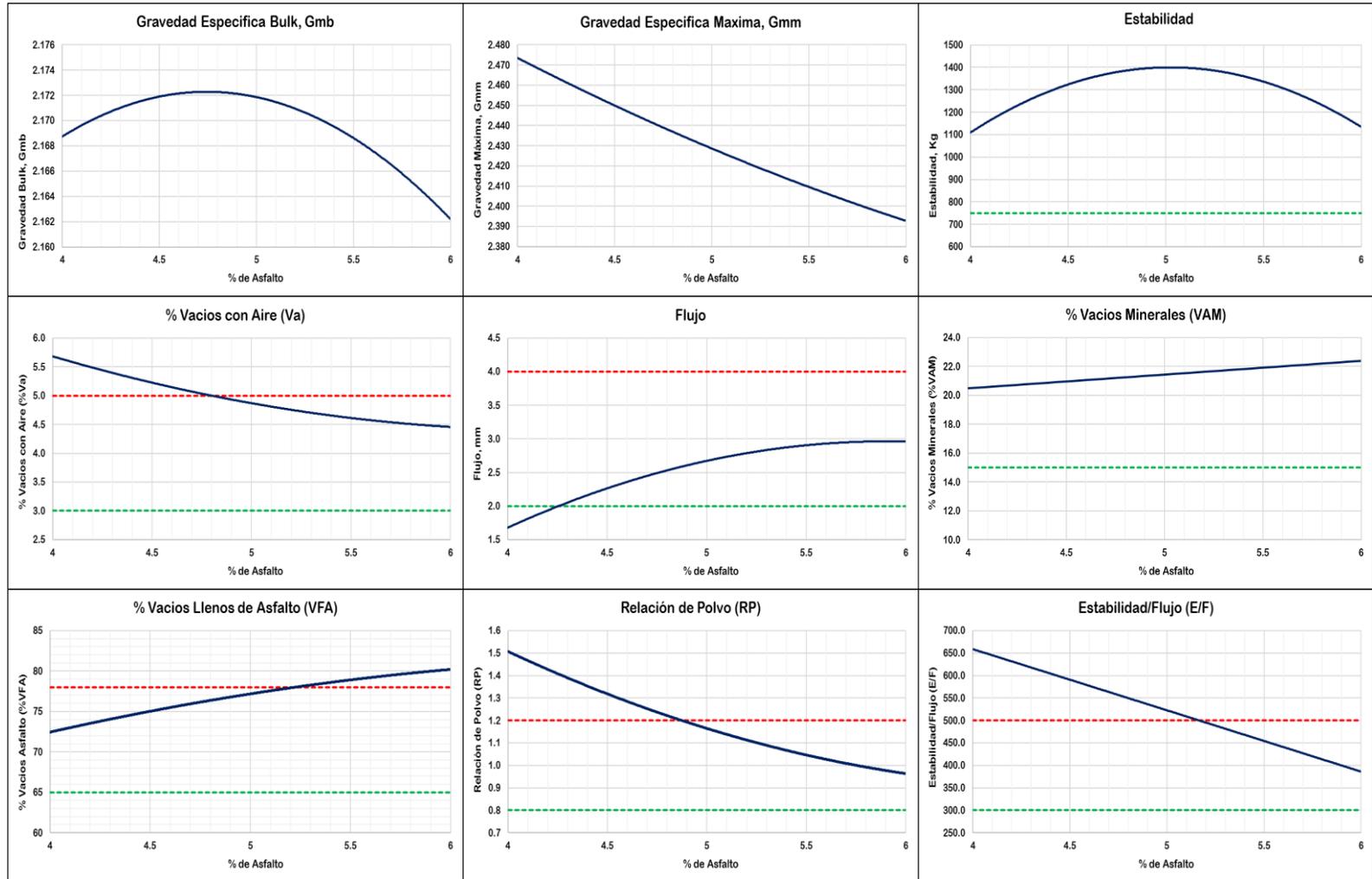
% Asfalto	Gmb	Gmm	Estabilidad (Kg)	% Va	Flujo (mm)	% VAM	% VFA	RP	E/F (Kg/mm)
4	2.168	2.473	1134.5	5.68	1.70	20.6	72.5	1.51	666.7
4.5	2.172	2.452	1265.4	5.26	2.20	20.9	74.8	1.31	574.8
5	2.174	2.426	1425.2	4.78	2.73	21.3	77.5	1.17	522.8
5.5	2.166	2.411	1361.0	4.70	2.90	22.0	78.6	1.04	470.0
6	2.163	2.393	1117.5	4.43	2.95	22.5	80.3	0.96	378.2
<i>Especificación</i>	-	-	≥ 750	3 - 5	2 - 4	≥ 15	65 - 78	0.8 - 1.2	300 - 500

Fuente. Elaboración propia

Una vez se tenga el resumen de los datos de diseño, con estos se procede a graficar cada una de las variables de diseño contempladas en las especificaciones, en la Figura 33 se observan las nueve variables, cabe aclarar que las variables de: gravedad específica bulk Gmb y de gravedad específica máxima Gmm no son criterio para definir el contenido óptimo de asfalto.

En la Figura 33 se observan cada una de las variables obtenidas del diseño Marshall, en cada una se presenta de color azul la curva de comportamiento de la variable en función del contenido de asfalto, adicionalmente se encuentran los límites definidos en la especificación de color verde el valor mínimo exigido y de color rojo el valor máximo permitido, para de esta manera poder determinar el contenido óptimo de asfalto.

Figura 33. Variables de diseño Marshall MD-12 Convencional



Fuente. Elaboración propia

A partir de las gráficas realizadas con los resultados del diseño preliminar de la mezcla asfáltica se continua con la determinación del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica tipo MD-12 Convencional, en la Tabla 26 se recopila la información de los porcentajes de asfalto que cumplen con la especificación correspondiente a una mezcla asfáltica MD-12 definida por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011.

Tabla 26. Determinación del contenido óptimo de asfalto MD-12 Convencional

Característica	% Asfalto																				
	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0
Flujo (mm)	Red	Red	Red	Red	Green	Yellow	Green														
Estabilidad (Kg)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green							
% VAM	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green							
% Va	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Yellow	Green							
% VFA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red						
E/F (kN/mm)	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Relación Polvo	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Yellow	Green							

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo a lo observado en la Tabla 26 con la cual se realizó la definición del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional, respecto a lo obtenido en las variables de diseño Marshall se puede analizar lo siguiente:

El flujo de la mezcla asfáltica MD-12 convencional no cumple con los requisitos hasta el 4.3% de asfalto, de ahí en adelante cumple con lo estipulado por el IDU. En cuanto a la estabilidad no se presentó ningún inconveniente debido a que para todos los porcentajes se supera el mínimo requerido de 750 Kg cumpliendo satisfactoriamente, igual ocurre con los vacíos en el agregado mineral VAM. La relación llenante ligante expresa una relación entre el porcentaje que pasa tamiz 200 y el asfalto efectivo se observa que este requisito lo cumplen contenidos de asfalto de hasta el 4.9%.

Una variable importante en la definición del porcentaje óptimo de asfalto son los vacíos con aire de la mezcla, el IDU exige que este valor se encuentre entre 3% y 5%, de acuerdo con esto la mezcla asfáltica cumple hasta un contenido de 4.7%. Para los vacíos llenos de asfalto VFA se tiene que entre el 4.0% y el 5.3% cumple el requisito presentando valores inferiores al máximo de 78%, a partir del 5.4% de asfalto la mezcla ya no presentaría propiedades adecuadas. Las especificaciones del IDU permiten un máximo de 500 Kg/mm para la relación Estabilidad/Flujo por lo cual este requisito se cumple para contenidos de asfalto del 5.1% en adelante.

De acuerdo con este análisis y luego de haber completado el diseño preliminar de la mezcla asfáltica tipo MD-12 que se empleará como capa de rodadura para un nivel de tránsito T2-T3, el contenido óptimo de asfalto para la mezcla convencional es de **5.2%**.

4.1.2 Verificación diseño preliminar MD-12 convencional. La mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional se diseñó y se obtuvo un contenido de asfalto óptimo de 5.2% el cual deberá verificarse de acuerdo con los parámetros exigidos por las especificaciones del IDU, para esto se fabrica un nuevo juego de tres briquetas con el contenido óptimo de asfalto de 5.2% y se verifica el cumplimiento de los requisitos, en la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos de ensayar las nuevas briquetas.

Tabla 27. Verificación del diseño preliminar MD-12 Convencional

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL					Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Corregida			
5.2	63.49	1200.0	1202.0	692.0	2.173	A	1996.1	2.615	78.2	0.0	4.8	17.0	0.2	21.8	77.8	5.0	1.14	1355.8	1.003	1359.9	2.84	497.4
	63.42	1199.0	1201.0	690.0	2.167	B	7069.8											1417.5	1.003	1421.7	2.72	
	63.46	1199.0	1201.0	686.0	2.150	C	8239.9											1358.1	1.003	1362.1	2.77	
					2.164		2.417														1381.2	

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con los cálculos realizados a la mezcla con contenido óptimo de asfalto de 5.2% se presenta en la Tabla 28 el resumen con los valores obtenidos, así como la observación en cuanto al cumplimiento de los requisitos definidos por el IDU en las especificaciones de construcción para una mezcla asfáltica densa en caliente MD-12 para un nivel de tránsito T2-T3.

Tabla 28. Resultados verificación MD-12 Convencional

Verificación de la Mezcla Asfáltica MD-12 Convencional			
% Óptimo de Asfalto		5.2	
Gravedad Específica Bulk, Gmb		2.164	
Gravedad Específica Máxima, Gmm		2.417	
Variable	Requisito IDU (T2 - T3)	Valor Obtenido	Observación
<i>Flujo (mm)</i>	2.0 - 4.0	2.78	<i>CUMPLE</i>
<i>Estabilidad (Kg)</i>	≥ 750	1381	<i>CUMPLE</i>
<i>% Va (Rodadura)</i>	3.0 - 5.0	4.84	<i>CUMPLE</i>
<i>% VAM (Mezclas 12)</i>	≥ 15	21.8	<i>CUMPLE</i>
<i>% VFA</i>	65 - 78	77.8	<i>CUMPLE</i>
<i>Relación Polvo</i>	0.8 - 1.2	1.14	<i>CUMPLE</i>
<i>E/F (Kg/mm)</i>	300 - 500	497.4	<i>CUMPLE</i>

Fuente. Elaboración propia

4.1.3 Verificación Índice de Película Asfáltica MD-12 Convencional. Otro parámetro de verificación que se solicita en las especificaciones generales de construcción del IDU es el Índice de Película de Asfalto IPA, en este parámetro se busca conocer el espesor de la película de asfalto que recubre los agregados combinados, el valor mínimo exigido es de 7.5 μm (micrómetros), en la Tabla 29 se presentan los resultados obtenidos para esta verificación.

Tabla 29. Índice de Película de Asfalto MD-12 Convencional

Índice de Película de Asfalto, IPA	
% Óptimo de Asfalto	
	5.2%
Asfalto Efectivo, Pbe	
	4.98%
Gravedad Específica Asfalto, Gb	
	1.014
Gravedad Específica Agregados, Gsb	
	2.623
Parametro	Valor
Granulometría	% Pasa Tamiz N° 4
	56.4
	% Pasa Tamiz N° 8
	42
	% Pasa Tamiz N° 16
	32
	% Pasa Tamiz N° 30
24	
% Pasa Tamiz N° 50	
15	
% Pasa Tamiz N° 100	
10	
% Pasa Tamiz N° 200	
5.7	
Superficie Específica Agregado, m^2/Kg	
	6.22
Índice de Película de Asfalto, IPA	
	8.25
Observación	
	CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

4.1.4 Verificación de adherencia MD-12 Convencional. Al verificar la adherencia se busca evaluar la susceptibilidad que puede llegar a tener la mezcla asfáltica antes la presencia de agua, esto se puede determinar mediante el ensayo de tracción indirecta el cual se realiza siguiendo lo descrito en la norma de ensayo INV. E-725-13. Para esto es necesario realizar dos grupos de briquetas, un juego se someterá a ensayo en condición seca y el otro en condición húmeda.

Inicialmente se deberá comprobar el grado o porcentaje de saturación de las briquetas correspondientes al grupo húmedo, los resultados de la verificación de saturación se observan en la Tabla 30.

Tabla 30. Comprobación de saturación MD-12 Convencional

	Briqueta	Alt.	Diam.	Peso sss	Peso Sumg.	(B-C) cm ³	%VA	VA	Peso Aire	V _{wa}	% Saturación	
GCR 0%	<i>Seco</i>	1	63.39	101.44	1207	675	532	4.83	-	1198	-	-
		2	63.85	101.42	1206	677	529	4.85	-	1200	-	-
		3	63.52	101.53	1204	675	529	4.81	-	1199	-	-
	<i>Humedo</i>	4	63.75	101.19	1212	676	536	4.90	39.1	1201	11	58.1
		5	63.05	101.28	1211	683	528	4.89	31.1	1201	10	62.2
		6	63.24	101.25	1211	681	530	4.82	33.5	1200	11	62.8

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 30 se presentan los resultados de saturación para el grupo en condición húmeda, esta comprobación se hace debido a que el valor de la saturación debe encontrarse entre el 55% y el 80% para poder continuar con el ensayo, como se observa el grupo húmedo se encuentra en el rango por lo cual se procede a realizar el ensayo de tracción indirecta, sometiendo las briquetas a cargas las cuales se presentan en la Tabla 31 a continuación:

Tabla 31. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 Convencional

	Briqueta	Diam. (mm)	Alt. (mm)	Carga (N)	
GCR 0%	<i>Seco</i>	1	101.44	63.39	13416
		2	101.42	63.85	13149
		3	101.53	63.52	12873
	<i>Humedo</i>	4	101.19	63.75	11072
		5	101.28	63.05	10725
		6	101.25	63.24	10627

Fuente. Elaboración propia

A partir de los datos registrados de carga se procede a calcular la resistencia retenida para cada uno de los grupos ensayados (húmedo y seco), luego se calcular una relación entre las dos para obtener la relación de resistencias a la tensión, dichos valores se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Relación de resistencias MD-12 Convencional

GCR 0%	RTS (kPa)	RTH (kPa)	RRT	Obs.
	1297.24	1072.81	82.7%	Cumple

Fuente. Elaboración propia

Según la especificación en cuanto al criterio de adherencia según el IDU la relación de resistencias debe ser superior al 80% lo cual se cumple satisfactoriamente para la mezcla asfáltica MD-12 convencional, luego de alcanzar la carga máxima se debe continuar la aplicación de carga hasta fracturar la briqueta para observar su composición interna, a continuación en la Figura 34 se observa como para esta mezcla asfáltica MD-12 convencional el recubrimiento entre agregados y asfalto es el adecuado, de igual manera la adherencia es buena ya que no se evidencian partículas considerablemente fracturadas y el color es homogéneo en la mayoría de la mezcla asfáltica.

Figura 34. Composición interna MD-12 Convencional



Fuente. Elaboración propia

4.1.5 Fórmula de trabajo mezcla asfáltica MD-12 convencional. Luego de realizar la verificación correspondiente al contenido óptimo de asfalto y que este cumpliera con las especificaciones definidas por el IDU en las especificaciones de construcción 2011, se procede a definir la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica la cual se presenta a continuación en la Tabla 33.

Tabla 33. Fórmula de trabajo MD-12 Convencional

Formula de Trabajo		
<i>Tipo de Mezcla</i>		MD - 12
<i>Cemento Asfáltico</i>		AC 80-100
<i>Granulometría</i>	<i>Grava</i>	43.6%
	<i>Fino</i>	50.7%
	<i>Filler</i>	5.7%
	<i>GCR</i>	0.0%
<i>Contenido de Asfalto</i>		5.2%
<i>Densidad de diseño, g/cm³</i>		2.164
<i>Temperatura, °C</i>	<i>Mezclado</i>	144 ± 3
	<i>Compactación</i>	134 ± 2

Fuente. Elaboración propia

4.2 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DEL 0.5% DE GCR

La adición de grano de caucho reciclado se realizara en tres mezclas asfálticas, la primera de ellas tendrá una adición de 0.5% de grano de caucho reciclado el cual será añadido por vía seca como reemplazo del agregado fino, debido a la adición de este material a la mezcla asfáltica se modifican ciertas propiedades de la mezcla por lo cual se hizo necesario incrementar los contenidos de asfalto de cada diseño Marshall con adición de grano de caucho reciclado, de esta manera en adelante se trabajaran porcentajes entre el 4.0% hasta el 6.5%.

4.2.1 Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 0.5% GCR.

En esta sección se reúnen los resultados obtenidos luego de realizar el diseño preliminar de la mezcla asfáltica tipo MD-12, en este caso la primera a la cual se le realiza la adición de grano de caucho reciclado GCR en un porcentaje de 0.5% de la fracción que comprende los tamices N° 10, N° 40 y N° 80.

Para estos diseños es necesario incluir la gravedad especifica del grano de caucho como parte del agregado combinado, así que como punto de partido se tienen unos datos de entrada correspondientes a las propiedades gravimétricas de los materiales involucrados en el diseño preliminar, a continuación, en la Tabla 34 se presentan los valores mencionados.

Tabla 34. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 0.5% GCR

Material	Gravedad Especifica, G_i	Proporción, %	
Grava	G_G	2.597	43.6
Finos	G_F	2.654	50.7
Filler	$G_{Pasa200}$	2.548	5.7
GCR	G_{GCR}	0.5	0.5
Asfalto	G_b	1.014	-
Parafina	G_p	0.92	-
Agregados	G_{sb}	2.568	-

Fuente. Elaboración propia

Como se observa la gravedad especifica de los agregados combinados disminuye al adicionar el grano de caucho, luego de realizar todo el proceso de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en laboratorio, junto con los datos indicados en la tabla anterior se realizan los cálculos pertinentes al diseño preliminar de la mezcla asfáltica con adición de 0.5% de grano de caucho reciclado, en la Tabla 35 se evidencian los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla asfáltica siguiendo la metodología Marshall con los cuales se procede a definir el contenido óptimo de asfalto.

Tabla 35. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con 0.5% GCR

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %					Variables MARSHALL				Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Corregida			
4	63.40	1201	1203	680	2.121	A	1894.7	2.564	78.8	0.4	5.8	15.0	0.1	21.2	70.7	3.9	1.47	1044.2	1.003	1047.3	2.11	508.0
	63.51	1200	1202	679	2.119	B	7069.8											1050.5	1.000	1050.5	2.16	
	63.56	1200	1202	679	2.119	C	8180.3											1089.1	1.000	1089.1	2.01	
				2.120	2.416													1062	2.09			
4.5	63.65	1201	1203	683	2.133	A	1996.3	2.572	78.9	0.4	5.3	15.4	0.1	21.1	72.8	4.4	1.30	1203.8	0.998	1201.4	2.59	463.2
	63.67	1201	1203	683	2.133	B	7069.8											1234.2	0.998	1231.8	2.54	
	63.61	1200	1202	682	2.131	C	8236.1											1192.9	0.998	1190.6	2.69	
				2.132	2.405													1208	2.61			
5	63.95	1200	1202	683	2.135	A	1984.4	2.561	78.6	0.4	4.8	16.2	0.2	21.4	75.6	4.8	1.19	1299.1	0.980	1273.1	2.90	453.1
	63.92	1199	1201	682	2.134	B	7069.8											1304.5	0.980	1278.4	2.84	
	63.78	1200	1202	683	2.135	C	8220.1											1321.8	0.995	1315.2	2.79	
				2.135	2.379													1289	2.84			
5.5	63.58	1202	1204	682	2.127	A	1970.7	2.559	77.8	0.4	4.7	17.1	0.3	22.2	77.0	5.2	1.09	1213.4	1.000	1213.4	2.90	421.0
	63.71	1202	1204	681	2.123	B	7069.8											1216.1	0.995	1210.0	2.95	
	63.62	1201	1203	681	2.125	C	8205.7											1236.5	0.998	1234.0	2.84	
				2.125	2.361													1219	2.90			
6	63.48	1201	1203	679	2.117	A	1925.6	2.556	77.0	0.4	4.6	18.0	0.4	23.0	78.3	5.7	1.01	1032.4	1.003	1035.5	3.25	330.5
	63.53	1200	1202	678	2.115	B	7069.8											1021.0	1.000	1021.0	3.15	
	63.47	1200	1202	678	2.115	C	8173.3											1055.1	1.003	1058.2	3.02	
				2.116	2.342													1038	3.14			
6.5	63.39	1201	1203	678	2.113	A	1983.8	2.563	76.5	0.4	4.5	18.7	0.2	23.5	79.3	6.4	0.90	959.8	1.005	964.6	3.30	295.9
	63.45	1200	1202	677	2.111	B	7069.8											966.6	1.003	969.5	3.15	
	63.47	1200	1202	677	2.111	C	8202.6											956.6	1.003	959.5	3.33	
				2.111	2.331													965	3.26			

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos en el diseño preliminar se realiza un resumen de las variables involucradas en la definición del porcentaje o contenido óptimo de asfalto según los criterios del Instituto Nacional de Vías en sus especificaciones generales de construcción del 2013. En la Tabla 36 se presentan los valores para cada uno de los porcentajes de asfalto trabajados en laboratorio.

Tabla 36. Resumen Diseño Marshall MD-12 con 0.5% GCR

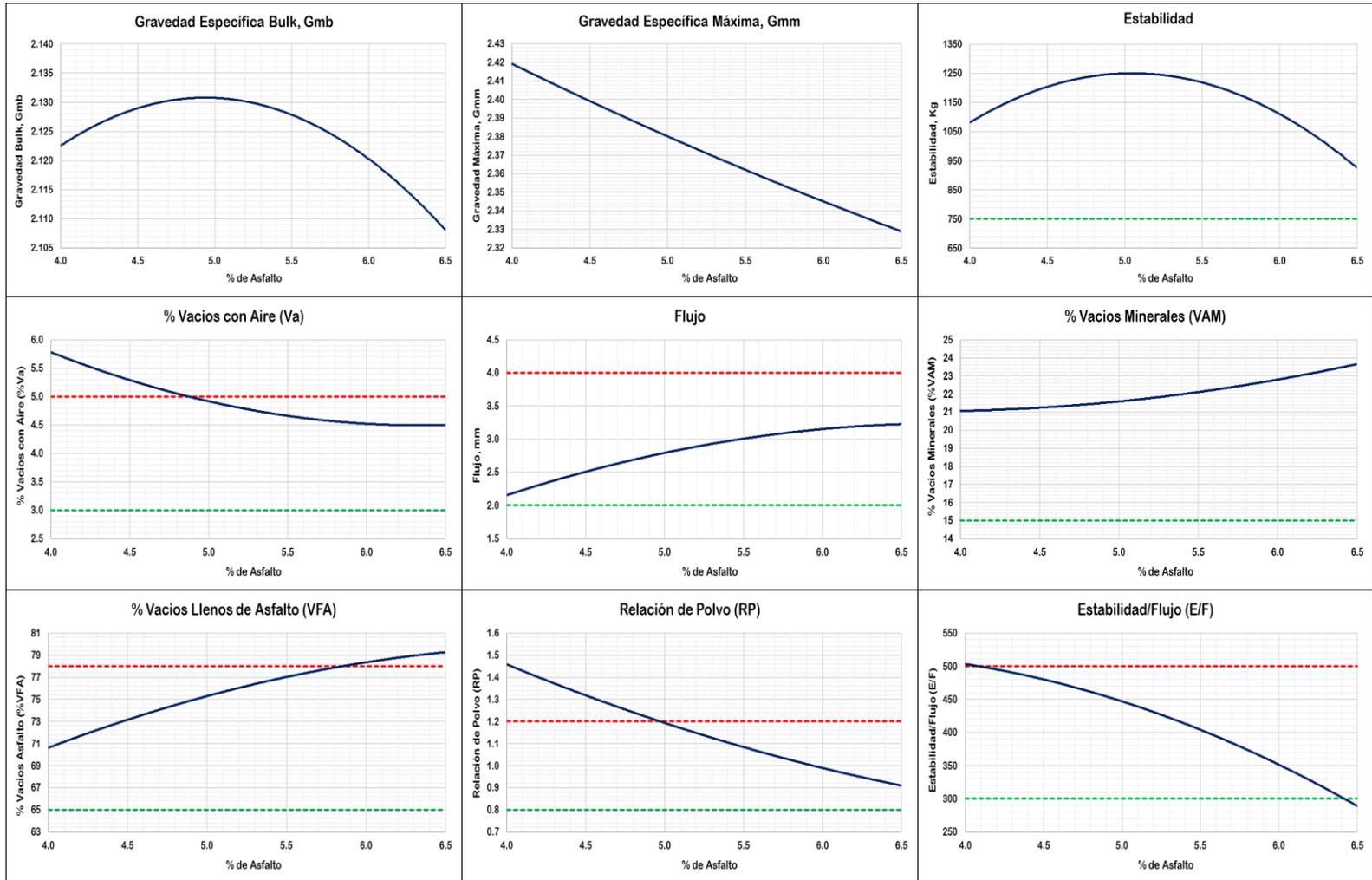
% Asfalto	Gmb	Gmm	Estabilidad (Kg)	% Va	Flujo (mm)	% VAM	% VFA	RP	E/F (Kg/mm)
4.0	2.120	2.416	1062	5.79	2.09	21.17	70.72	1.471	508
4.5	2.132	2.405	1217	5.32	2.61	21.11	72.83	1.297	467
5.0	2.135	2.379	1289	4.81	2.84	21.44	75.62	1.191	453
5.5	2.125	2.361	1219	4.71	2.90	22.23	76.95	1.089	421
6.0	2.116	2.342	1038	4.57	3.14	22.97	78.30	1.008	331
6.5	2.111	2.331	965	4.46	3.26	23.53	79.29	0.898	296
<i>Especificación</i>	-	-	≥ 750	3 - 5	2 - 4	≥ 15	65 - 78	0.8 - 1.2	300 - 500

Fuente. Elaboración propia

Una vez realizado el resumen de los datos de diseño, con estos se procede a graficar cada una de las variables de diseño contempladas en las especificaciones, en la Figura 35 se observan las nueve variables, cabe aclarar que las variables de: gravedad específica bulk Gmb y de gravedad específica máxima Gmm no son criterio para definir el contenido óptimo de asfalto.

En la Figura 35 se observan cada una de las variables obtenidas del diseño Marshall, en cada una se presenta de color azul la curva de comportamiento de la variable en función del contenido de asfalto, adicionalmente se encuentran los límites definidos en la especificación de color verde el valor mínimo exigido y de color rojo el valor máximo permitido, para de esta manera poder determinar el contenido óptimo de asfalto.

Figura 35. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 0.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

A partir de las gráficas realizadas con los resultados del diseño preliminar de la mezcla asfáltica se continua con la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica tipo MD-12 con grano de caucho reciclado adicionado en 0.5%, en la Tabla 37 se recopila la información de los porcentajes de asfalto que cumplen con la especificación correspondientes a una mezcla asfáltica MD-12 para capa de rodadura con un nivel de tránsito T2-T3 según lo definido por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011.

Tabla 37. Determinación contenido óptimo de asfalto MD-12 con 0.5% GCR

Característica	% Asfalto																									
	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6.0	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5
Flujo (mm)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green								
Estabilidad Minima (N)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green								
% VAM minimo	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green								
% Va	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Yellow	Green														
% VFA	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Red	Red	Red
E/F (kN/mm)	Red	Red	Green	Yellow	Green	Red																				
Relación Polvo	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Yellow	Green								

Fuente. Elaboración propia

Una vez realizado el diseño preliminar de la mezcla asfáltica en caliente tipo MD-12 con adición del 0.5% de grano de caucho GCR y de acuerdo a lo observado en la Tabla 37 respecto a las variables de diseño Marshall se puede analizar lo siguiente:

Se puede definir el contenido óptimo de asfalto satisfactoriamente ya que todas las variables de diseño tienen una franja en común en la cual cumplen con los requisitos necesarios. Las variables de: flujo, estabilidad y vacíos en el agregado mineral (VAM) cumplen para todos los porcentajes de asfalto, es decir de 4.0% hasta el 6.5%, no hay inconveniente ya que superan los valores mínimos exigidos.

En cuanto a la variable de vacíos con aire esta cumple del 4.9% en adelante con el requisito indicado por el IDU, esta quizá es una de las variables más importante en la definición del contenido óptimo de asfalto, para los vacíos llenos de asfalto VFA se tiene que entre el 4.0% y el 5.8% cumple el requisito presentando valores inferiores al máximo de 78%. La relación llenante ligante debe encontrarse en un rango de 0.8 a 1.2 de acuerdo con esto la mezcla presenta el cumplimiento de esta variable del 5.1% en adelante. Para la relación Estabilidad/Flujo el requisito se cumple para contenidos de asfalto entre 4.2% y 6.3% según el máximo permitido de 500 Kg/mm indicado en las especificaciones del IDU.

De acuerdo con este análisis y luego de haber completado el diseño preliminar de la mezcla asfáltica tipo MD-12 que se empleará como capa de rodadura para un nivel de tránsito T2-T3, el contenido óptimo de asfalto para la mezcla con adición del 0.5% de GCR es de **5.5%**.

4.2.2 Verificación Diseño preliminar MD-12 con adición de 0.5% GCR. La mezcla asfáltica tipo MD-12 con adición de grano de caucho reciclado en un 0.5% se diseñó y se obtuvo un contenido de asfalto óptimo de 5.5% el cual deberá verificarse de acuerdo con los parámetros exigidos por las especificaciones del IDU, para esto se fabrica un nuevo juego de tres briquetas con el contenido óptimo de asfalto de 5.5% y se verifica el cumplimiento de los requisitos, en la Tabla 38 se presentan los resultados obtenidos de ensayar las nuevas briquetas.

Tabla 38. Verificación del diseño preliminar MD-12 con 0.5% GCR

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Específicos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL					Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Corregida			
5.5	63.48	1200	1202	681	2.127	A	2001.14	2.556	78.0	0.4	4.6	17.1	0.4	22.0	77.5	5.2	1.10	1190.2	1.003	1193.8	3.12	411.0
	63.45	1200	1202	681	2.127	B	7069.80											1183.9	1.003	1187.4	2.62	
	63.51	1198	1200	682	2.136	C	8222.56											1231.0	1.000	1231.0	3.05	
					2.130		2.359															

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo con los cálculos realizados a la mezcla con contenido óptimo de asfalto de 5.5% se presenta en la Tabla 39 el resumen con los valores obtenidos, así como la observación en cuanto al cumplimiento de los requisitos definidos por el IDU en las especificaciones de construcción para una mezcla asfáltica densa en caliente MD-12 para un nivel de tránsito T2-T3.

Tabla 39. Resultados verificación MD-12 con 0.5% GCR

Verificación Mezcla Asfáltica MD-12 + 0.5% GCR			
% Óptimo de Asfalto		5.5	
Gravedad Específica Bulk, Gmb		2.130	
Gravedad Específica Máxima, Gmm		2.359	
Variable	Requisito IDU (T2 - T3)	Valor Obtenido	Observación
<i>Flujo (mm)</i>	2.0 - 4.0	2.93	<i>CUMPLE</i>
<i>Estabilidad (Kg)</i>	≥ 750	1204	<i>CUMPLE</i>
<i>% Va (Rodadura)</i>	3.0 - 5.0	4.55	<i>CUMPLE</i>
<i>% VAM (Mezclas 12)</i>	15	22.0	<i>CUMPLE</i>
<i>% VFA</i>	65 - 78	77.5	<i>CUMPLE</i>
<i>Relación Polvo</i>	0.8 - 1.2	1.10	<i>CUMPLE</i>
<i>E/F (Kg/mm)</i>	300 - 500	411.0	<i>CUMPLE</i>

Fuente. Elaboración propia

4.2.3 Verificación Índice de Película Asfáltica MD-12 con adición de 0.5% GCR.

Otro parámetro de verificación que se solicita en las especificaciones generales de construcción del IDU es el Índice de Película de Asfalto IPA, en este parámetro se busca conocer el espesor de la película de asfalto que recubre los agregados combinados, el valor mínimo exigido es de 7.5 μm (micrómetros), en la Tabla 40 se presentan los resultados obtenidos para esta verificación.

Tabla 40. Índice de Película de Asfalto MD-12 con 0.5% GCR

Índice de Película de Asfalto, IPA		
% Óptimo de Asfalto		5.5%
Asfalto Efectivo, Pbe		5.14%
Gravedad Específica Asfalto, Gb		1.014
Gravedad Específica Agregados, Gsb		2.568
Parametro		Valor
Granulometría	% Pasa Tamiz N° 4	56.4
	% Pasa Tamiz N° 8	42
	% Pasa Tamiz N° 16	32
	% Pasa Tamiz N° 30	24
	% Pasa Tamiz N° 50	15
	% Pasa Tamiz N° 100	10
	% Pasa Tamiz N° 200	5.7
Superficie Específica Agregado, m ² /Kg		6.22
Índice de Película de Asfalto, IPA		8.40
Observación		CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

4.2.4 Verificación de Adherencia MD-12 con adición de 0.5% GCR. Se realiza la fabricación de los dos subgrupos de ensayo para realizar el ensayo de tracción indirecta, el grupo seco permanece 24 horas a una temperatura ambiente y el grupo húmedo permanece durante el mismo tiempo en un baño de agua a 60°C. luego de este tiempo se verificará la saturación del grupo húmedo, los resultados de la verificación de saturación se observan en la Tabla 41.

Tabla 41. Comprobación de saturación MD-12 con adición de 0.5% GCR

	Briqueta	Alt.	Diam.	Peso sss	Peso Sumg.	(B-C) cm ³	%VA	VA	Peso Aire	Vwa	% Saturación	
GCR 0,5%	Seco	1	63.49	101.29	1204	677	527	4.47	-	1200	-	-
		2	63.42	101.40	1203	680	523	4.52	-	1199	-	-
		3	63.49	101.43	1205	682	523	4.64	-	1200	-	-
	Humedo	4	63.16	101.25	1207	683	524	4.50	15.31	1200	7	65.7
		5	63.37	101.41	1201	672	529	4.54	22.43	1195	6	66.8
		6	63.35	101.39	1205	679	526	4.49	18.16	1198	7	68.8

Fuente. Elaboración propia

El valor de la saturación debe encontrarse entre el 55% y el 80% para poder continuar con el ensayo, de acuerdo con esto en la Tabla 41 se presentan los resultados de saturación para el grupo en condición húmeda, como se observa el grupo húmedo se encuentra en el rango por lo cual se procede a realizar el ensayo de tracción indirecta, sometiendo las briquetas a cargas las cuales se presentan en la Tabla 42 a continuación:

Tabla 42. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 0.5% GCR

GCR 0,5%	Briqueta	Diam. (mm)	Alt. (mm)	Carga (N)
	Seco	1	101.29	63.49
2		101.40	63.42	12059
3		101.43	63.49	11556
Humedo	4	101.25	63.16	9737
	5	101.41	63.37	10089
	6	101.39	63.35	9782

Fuente. Elaboración propia

A partir de los datos registrados de carga se procede a calcular la resistencia retenida para cada uno de los grupos ensayados (húmedo y seco), luego se deberá calcular la relación de resistencias a la tensión, dichos valores se presentan en la Tabla 43, según la especificación del criterio de adherencia según el IDU la relación de resistencias debe ser superior al 80% lo cual se cumple satisfactoriamente para la mezcla asfáltica MD-12 con adición del 0.5% de grano de caucho reciclado con un valor de 84.6%.

Tabla 43. Relación de resistencias MD-12 con adición de 0.5% GCR

GCR 0,5%	RTS (kPa)	RTH (kPa)	RRT	Obs.
	1157.12	979.41	84.6%	Cumple

Fuente. Elaboración propia

Luego de alcanzar la carga máxima se debe continuar la aplicación de carga hasta fracturar la briketa para observar su composición interna, a continuación, en la Figura 36 se observa como la adherencia para esta mezcla asfáltica MD-12 con adición de grano de caucho en un 0.5% es buena debido a que se evidencia homogeneidad en el color de la mezcla y no se observan partículas considerablemente fracturadas, lo que de igual manera es sinónimo de un recubrimiento satisfactorio entre agregados y asfalto.

Figura 36. Composición interna MD-12 con adición de 0.5% GCR



Fuente. Elaboración propia

4.2.5 Fórmula de trabajo mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 0.5%.

Luego de realizar la verificación correspondiente al contenido óptimo de asfalto y que este cumpliera con las especificaciones definidas por el IDU en las especificaciones de construcción 2011, se procede a definir la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica la cual se presenta a continuación en la Tabla 44.

Tabla 44. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 0.5% GCR

Formula de Trabajo		
<i>Tipo de Mezcla</i>		MD - 12
<i>Cemento Asfáltico</i>		AC 80-100
<i>Granulometría</i>	<i>Grava</i>	43.6%
	<i>Fino</i>	50.2%
	<i>Filler</i>	5.7%
	<i>GCR</i>	0.5%
<i>Contenido de Asfalto</i>		5.5%
<i>Densidad de diseño, g/cm³</i>		2.130
<i>Temperatura, °C</i>	<i>Mezclado</i>	144 ± 3
	<i>Compactación</i>	134 ± 2

Fuente. Elaboración propia

4.3 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DEL 1.5% DE GCR

A partir de aquí se da una descripción de los resultados obtenidos en el diseño de la mezcla asfáltica MD-12 la cual contiene una adición del 1.5% de grano de caucho reciclado, estos resultados se obtienen de aplicar la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas densas en caliente.

4.3.1 Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% GCR.

Una vez realizados los ensayos descritos en el diseño preliminar para la mezcla asfáltica con adición de grano de caucho reciclado se realizó el procesamiento de la información para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto y así poder elaborar la mezcla asfáltica modificada con 1.5% de GCR.

En la Tabla 45 se muestran las demás variables necesarias para la determinación de las propiedades del diseño Marshall, como lo son la gravedad específica de los materiales y la proporción de los agregados a emplear en la mezcla asfáltica.

Tabla 45. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

Material	Gravedad Específica, G_i	Proporción, %	
Grava	G_G	2.597	43.6
Finos	G_F	2.654	49.2
Filler	$G_{pasa200}$	2.548	5.7
GCR	G_{GCR}	0.5	1.5
Asfalto	G_b	1.014	-
Parafina	G_p	0.92	-
Agregados	G_{sb}	2.465	-

Fuente. Elaboración propia

El cálculo del porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica se realizó en base a los datos obtenidos en laboratorio, luego de realizar los cálculos del diseño preliminar de la mezcla asfáltica con adición de 1.5% de grano de caucho.

En la Tabla 46 se muestran los resultados obtenidos en el diseño preliminar de la mezcla asfáltica con adición de 1.5% de grano de caucho reciclado siguiendo la metodología Marshall.

Tabla 46. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL					Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm (rice)	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Correg.			
4	63.47	1201	1203	653	2.016	A	1994.74	2.470	77.25	1.23	6.81	14.71	0.15	22.75	64.66	3.9	1.48	1004.3	1.003	1007.3	3.40	265.9
	63.47	1200	1202	652	2.015	B	7069.80											982.9	1.003	985.9	3.78	
	63.51	1200	1202	652	2.015	C	8210.57											945.3	1.000	945.3	3.86	
				2.015		2.336												979	3.68			
4.5	63.43	1200	1202	656	2.029	A	1998.42	2.459	77.27	1.23	6.08	15.42	0.19	22.73	67.85	4.3	1.32	1148.5	1.003	1151.9	2.90	313.0
	63.47	1199	1201	654	2.024	B	7069.80											1018.8	1.003	1021.8	4.14	
	63.45	1200	1202	655	2.026	C	8203.42											972.0	1.003	975.0	3.02	
				2.026		2.311												1050	3.35			
5	63.33	1200	1202	658	2.037	A	2000.40	2.453	77.18	1.24	5.48	16.10	0.38	22.82	70.55	4.6	1.23	989.7	1.005	994.7	2.69	335.7
	63.34	1201	1203	657	2.031	B	7069.80											1173.4	1.005	1179.3	3.25	
	63.50	1200	1202	658	2.037	C	8196.85											1051.4	1.000	1051.4	3.66	
				2.035		2.290												1075	3.20			
5.5	63.40	1201	1203	656	2.027	A	1997.50	2.458	76.63	1.24	5.36	16.77	0.22	23.37	71.76	5.3	1.08	977.9	1.003	980.9	2.49	351.1
	63.47	1201	1203	656	2.027	B	7069.80											1012.0	1.003	1015.0	3.05	
	63.41	1199	1201	658	2.039	C	8191.06											1158.0	1.003	1161.5	3.45	
				2.031		2.280												1052	3.00			
6	63.41	1200	1202	655	2.026	A	1998.40	2.451	76.08	1.23	5.06	17.63	0.44	23.92	73.71	5.6	1.02	990.2	1.003	993.2	3.45	335.4
	63.38	1200	1202	655	2.026	B	7069.80											968.9	1.005	973.7	3.10	
	63.46	1201	1203	657	2.031	C	8183.57											1045.5	1.003	1048.7	2.44	
				2.027		2.259												1005	3.00			
6.5	63.50	1200	1202	656	2.029	A	1978.42	2.470	75.71	1.23	4.80	18.26	0.14	24.29	75.17	6.4	0.90	901.3	1.000	901.3	2.79	298.9
	63.47	1200	1202	656	2.029	B	7069.80											891.3	1.003	894.0	3.00	
	63.45	1203	1205	657	2.027	C	8167.86											934.9	1.003	937.7	3.35	
				2.029		2.247												911	3.05			

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos del diseño preliminar se realiza un resumen de las variables necesarias para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, según los criterios establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en las especificaciones generales de construcción de carreteras. En la Tabla 47 se evidencian los valores para cada uno de los porcentajes de asfalto analizados en laboratorio.

Tabla 47. Resumen Diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

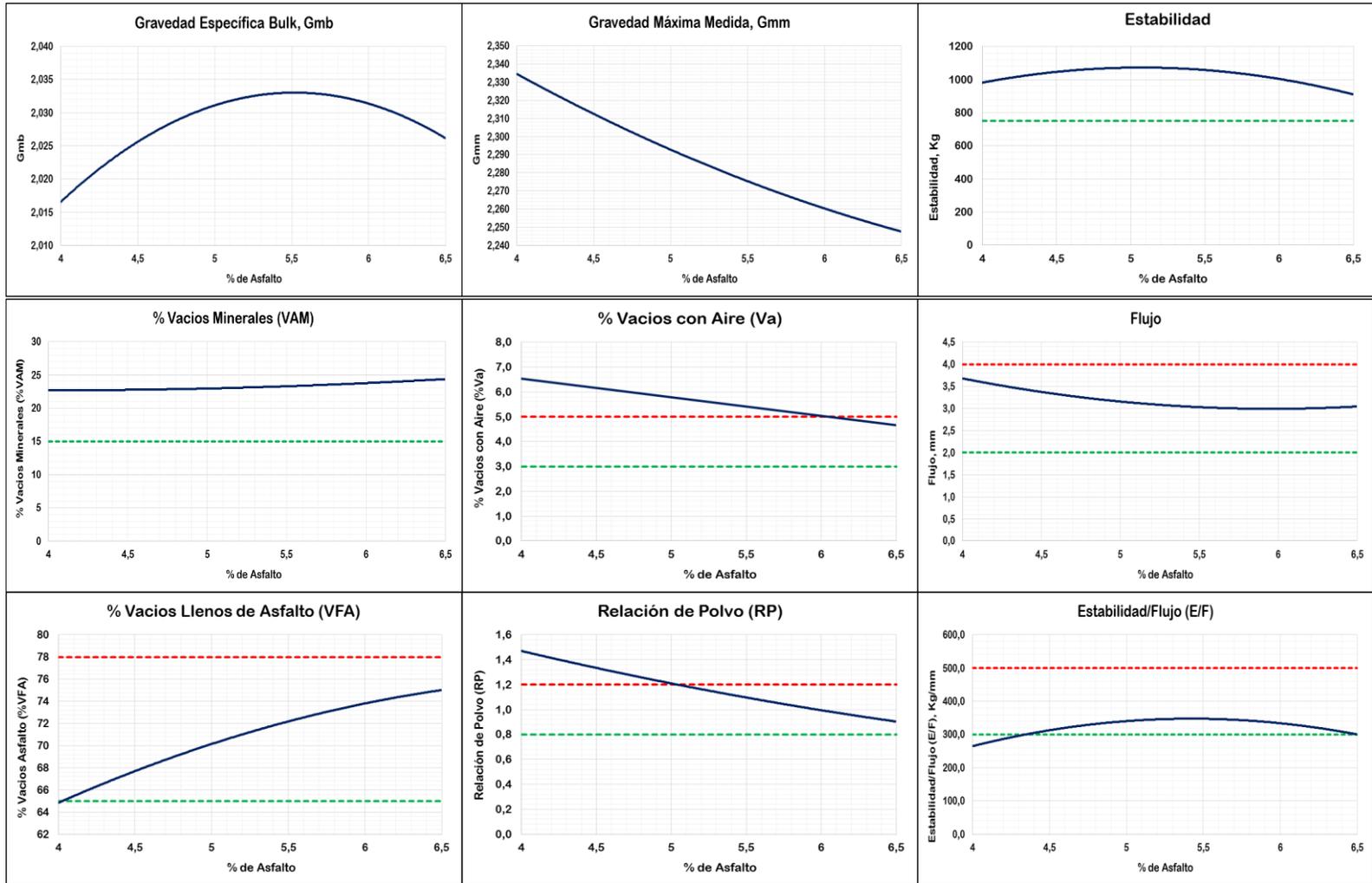
<i>Diseño de Mezclas Asfálticas Metodo Marshall</i>									
% Asfalto	Gmb	Gmm	Estabilidad (Kg)	% Va	Flujo (mm)	% VAM	% VFA	RP	E/F (Kg/mm)
4	2.015	2.336	979	6.81	3.68	22.8	64.7	1.478	265.9
4.5	2.026	2.311	1050	6.08	3.35	22.7	67.8	1.320	313.0
5	2.035	2.290	1075	5.48	3.20	22.8	70.5	1.228	335.7
5.5	2.031	2.280	1052	5.36	3.00	23.4	71.8	1.076	351.1
6	2.027	2.259	1005	5.06	3.00	23.9	73.7	1.018	335.4
6.5	2.029	2.247	911	4.80	3.05	24.3	75.2	0.895	298.9
<i>Especificación</i>	-	-	≥ 750	3 - 5	2 - 4	≥ 15	65 - 78	0.8 - 1.2	300 - 500

Fuente. Elaboración propia

Realizado el procesamiento de la información del Diseño Marshall, se graficó cada una de las variables del diseño contemplados en las especificaciones, en la Figura 37 se presenta cada una de las variables de análisis para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con adición de 1.5% de GCR, adicionalmente se presenta las gráficas de gravedad específica bulk y gravedad máxima medida con el fin de evaluar el comportamiento de estas en función del porcentaje de asfalto de la mezcla.

Para la definición del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla gráficamente se trazaron los rangos de las especificaciones dentro de cada una de las variables teniendo así; línea de color verde indica el valor mínimo y de igual manera la línea de color rojo indica el valor máximo indicado por las especificaciones.

Figura 37. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 1.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

El análisis gráfico para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto se realiza para una capa de rodadura y un nivel de tránsito T2-T3, de acuerdo a los aspectos mencionados y a las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011 se elabora la Tabla 48 en la que se presenta la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para la asfáltica MD-12 con adición de GCR de 1.5%.

Tabla 48. Determinación óptimo de asfalto MD-12 con 1.5% de GCR.

Característica	% Asfalto																									
	4,0	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5,0	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6,0	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5
Flujo (mm)																										
Estabilidad (Kg)																										
% VAM																										
% Va																										
% VFA																										
E/F (kg/mm)																										
Relación Polvo																										

Fuente. Elaboración propia

De la Tabla 48 se puede establecer el comportamiento de las variables del Diseño Marshall para la mezcla MD-12 modifica con adición de GCR de 1.5%, de lo cual se determina que:

El porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla es de **6.2%**, ya que cumple todas las especificaciones establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011 en la tabla 510.8 criterios de diseño de la mezcla asfáltica.

Las variables del flujo, estabilidad y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral cumplen las especificaciones para todos los porcentajes de asfalto, de igual manera se puede establecer que el porcentaje de vacíos llenos de asfalto cumple las especificaciones después del 4.2% de asfalto hasta el rango máximo de 6.5% de asfalto para el cual se elaboró la mezcla asfáltica.

El porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica es aceptable para los porcentajes de asfalto mayores al 6.0%, para la relación llenante ligante en la mezcla asfáltica se tiene que cumple criterios de especificación desde el 5.2% de asfalto, la relación estabilidad flujo presenta condiciones óptimas en la mezcla en el rango de 4.5%-6.4%.

Es importante señalar que el porcentaje óptimo de asfalto se calculó como el promedio del rango que cumple todos los requisitos establecidos por las especificaciones IDU 2011, para una capa de rodadura y un nivel de tránsito T2-T3.

4.3.2 Verificación del diseño preliminar MD-12 con adición del 1.5% GCR. Una vez determinado el valor del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica de estudio se procede a realizar la verificación del diseño preliminar el cual consiste en la elaboración de tres briquetas con **6.2%** de asfalto, las cuales se evaluarán con las especificaciones del IDU, y así poder dar continuidad con la investigación.

En la Tabla 49 se presenta los valores de las variables Marshall para las briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto correspondientes a la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% de grano de caucho reciclado.

Tabla 49. Resultados verificación MD-12 con adición de 1.5% de GCR

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL					Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm (rice)	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Correg.			
6.2	63.45	1201	1203	657	2.031	A	1998.41	2.450	76.0	1.2	4.87	17.9	0.47	24.0	74.6	5.8	0.99	972.0	1.003	975.0	3.12	320.8
	63.50	1200	1202	656	2.029	B	7069.80											945.3	1.000	945.3	2.62	
	63.48	1197	1199	654	2.028	C	8180.92											896.3	1.003	899.0	3.05	
					2.030		2.252															

Fuente. Elaboración propia

Realizados los cálculos Marshall a la mezcla asfáltica con adición de 1.5% de GCR con porcentaje óptimo de asfalto de 6.2%, se elabora la Tabla 50 en la cual se presenta la evaluación y criterio de aceptación de acuerdo a las especificaciones IDU para una mezcla asfáltica densa en caliente MD-12 para un nivel de tránsito T2-T3.

Tabla 50. Resultados verificación MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

Verificación de la Mezcla Asfáltica MD-12 con 0.5% GCR			
<i>% Óptimo de Asfalto</i>		6.2	
<i>Gravedad Específica Bulk, Gmb</i>		2.030	
<i>Gravedad Específica Máxima, Gmm</i>		2.252	
Variable	Requisito IDU (T2 - T3)	Valor Obtenido	Observación
<i>Flujo (mm)</i>	2.0 - 4.0	2.93	<i>Cumple</i>
<i>Estabilidad (Kg)</i>	≥ 750	940	<i>Cumple</i>
<i>% Va (Rodadura)</i>	3.0 - 5.0	4.87	<i>Cumple</i>
<i>% VAM (Mezclas 12)</i>	≥ 15	24.0	<i>Cumple</i>
<i>% VFA</i>	65 - 78	74.6	<i>Cumple</i>
<i>Relación Polvo</i>	0.8 - 1.2	0.988	<i>Cumple</i>
<i>E/F (Kg/mm)</i>	300 - 500	320.8	<i>Cumple</i>

Fuente. Elaboración propia

4.3.3 Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 1.5% GCR. Según lo estipulado en las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011, se debe realizar el análisis de verificación del Índice de película de asfalto, este parámetro define el valor del espesor de la película de asfalto que cubre los agregados combinados el cual de acuerdo a las especificaciones debe ser mínimo 7.5 μm (micrómetros). En la Tabla 51 se presentan los resultados obtenidos de la verificación del índice IPA.

Tabla 51. Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 1.5% de GCR.

Índice de Película de Asfalto, IPA		
	<i>% Óptimo de Asfalto</i>	6.2%
	<i>Asfalto Efectivo, Pbe</i>	5.77%
	<i>Gravedad Específica Asfalto, Gb</i>	1.014
	<i>Gravedad Específica Agregados, Gsb</i>	2.465
Parametro		Valor
Granulometría	<i>% Pasa Tamiz N° 4</i>	56.4
	<i>% Pasa Tamiz N° 8</i>	42
	<i>% Pasa Tamiz N° 16</i>	32
	<i>% Pasa Tamiz N° 30</i>	24
	<i>% Pasa Tamiz N° 50</i>	15
	<i>% Pasa Tamiz N° 100</i>	10
	<i>% Pasa Tamiz N° 200</i>	5.7
	<i>Superficie Específica Agregado, m²/Kg</i>	6.22
	Índice de Película de Asfalto, IPA	9.08
	<i>Observación</i>	CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

El índice de película de asfalto (IPA) obtenido para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% de grano de caucho reciclado es de 9.08 μm , el cual evaluado con el valor mínimo estipulado por las especificaciones se puede establecer que **Cumple** este criterio de verificación.

4.3.4 Verificación Adherencia MD-12 con adición de GCR de 1.5%. La verificación de la Adherencia en la mezcla asfáltica se realizó según lo estipulado en la norma de ensayo INV.E 725-13, la cual menciona el procedimiento para la evaluación de la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. La verificación se debe realizar con dos grupos de briquetas, un juego que se someterá en condición húmeda y otro en condición seca.

Para la verificación de la Adherencia también es necesario realizar la evaluación del grado de saturación de las briquetas en condición húmedo, los resultados de esta verificación se presentan en la Tabla 52.

Tabla 52. Comprobación de saturación MD-12 con adición de GCR de 1.5%.

GCR 1.5%	Briqueta	Alt.	Diam.	Peso sss	Peso Sumg.	(B-C) cm ³	%VA	VA	Peso Aire	V _{wa}	% Saturación
	Seco	1	63.86	101.46	1205	677	528	4.81	-	1202	-
2		63.14	101.43	1204	680	524	4.75	-	1200	-	-
3		63.46	101.39	1205	679	526	4.92	-	1199	-	-
Humedo	4	63.40	101.13	1207	673	534	4.83	10.25	1202	5	78.8
	5	63.17	101.14	1205	665	540	4.75	18.87	1196	9	77.7
	6	63.30	101.14	1204	671	533	4.89	10.56	1199	5	77.3

Fuente. Elaboración propia

La verificación de la saturación realizada a las probetas en estado húmedo arroja los valores presentados en la Tabla 52, los cuales al realizar la comparación de la norma de ensayo estipula que este valor debe encontrarse en el rango de 55% al 80%, como se observa este grupo de briquetas con la adición de 1.5% de GCR cumple este criterio, por lo que se procede a realizar el ensayo de tracción indirecta, sometiendo las briquetas a cargas, de este proceso se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla 53.

Tabla 53. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 1.5%

GCR 1.5%	Briqueta	Diam. (mm)	Alt. (mm)	Carga (N)
	Seco	1	101.46	63.86
2		101.43	63.14	9301
3		101.39	63.46	9377
Humedo	4	101.13	63.40	8505
	5	101.14	63.17	8056
	6	101.14	63.30	8603

Fuente. Elaboración propia

A partir de los datos registrados de carga se procede a calcular la resistencia retenida para cada uno de los grupos ensayados (húmedo y seco), luego se calcula una relación entre las dos para obtener la relación de resistencias a la tensión, dichos valores se presentan en la Tabla 54.

Tabla 54. Relación de resistencias MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

GCR 1.5%	RTS (kPa)	RTH (kPa)	RRT	Obs.
	925.70	834.18	90.1%	Cumple

Fuente. Elaboración propia

El criterio de verificación de la adherencia en mezclas asfálticas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), exige que la relación de resistencias debe ser superior al 80%, según lo presentado anteriormente se establece que la mezcla asfáltica tipo MD-12 con adición de GCR de 1.5% cumple satisfactoriamente este parámetro de verificación.

Con el fin de realizar una verificación de la composición interna de la briqueta se aplica carga hasta fracturarla, en la Figura 38 se observa estas propiedades de adherencia en las briquetas, se puede determinar visualmente el recubrimiento es el adecuado entre el asfalto y los agregados por su color homogéneo en toda la briqueta, además se puede establecer que la adherencia es adecuada ya que no se observan partículas considerablemente fracturadas.

Figura 38. Composición Interna MD-12 con adición de 1.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

4.3.5 Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica MD-12 con adición de GCR de 1.5%. Luego de realizar la verificación correspondiente al contenido óptimo de asfalto y que este cumpliera con las especificaciones definidas por el IDU en las especificaciones de construcción 2011, se procede a definir la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica la cual se presenta a continuación en la Tabla 55.

Tabla 55. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 1.5% GCR

Fórmula de Trabajo		
<i>Tipo de Mezcla</i>		MD – 12
<i>Cemento Asfáltico</i>		AC 80-100
<i>Granulometría</i>	<i>Grava</i>	43.6%
	<i>Fino</i>	49.2%
	<i>Filler</i>	5.7%
	<i>GCR</i>	1.5%
<i>Contenido de Asfalto</i>		6.2%
<i>Densidad de diseño, g/cm³</i>		2.03
<i>Temperatura, °C</i>	<i>Mezclado</i>	144 ± 3
	<i>Compactación</i>	134 ± 2

Fuente. Elaboración propia

4.4 MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 CON ADICIÓN DE 2.5% DE GCR

Una vez realizados los ensayos descritos en el diseño preliminar para la mezcla asfáltica con adición de grano de caucho reciclado se realizó el procesamiento de la información para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto y así poder elaborar la mezcla asfáltica modificada con 2.5% de GCR.

4.4.1 Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 2.5% GCR.

En la Tabla 55 se muestra las demás variables necesarias para la determinación de las propiedades del diseño Marshall, como lo son la gravedad específica de los materiales y la proporción de los agregados a emplear en la mezcla asfáltica.

Tabla 55. Datos iniciales diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR.

Material	Gravedad Específica, G_i	Proporción, %
<i>Grava</i>	G_G	2.597
<i>Finos</i>	G_F	2.654
<i>Filler</i>	G_{pasa200}	2.548
<i>GCR</i>	G_{GCR}	0.5
<i>Asfalto</i>	G_b	1.014
<i>Parafina</i>	G_p	0.92
<i>Agregados</i>	G_{sb}	2.370

Fuente. Elaboración propia

El cálculo del porcentaje óptimo de la mezcla asfáltica se realizó en base a los datos obtenidos en laboratorio, luego de realizar los cálculos del diseño preliminar de la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de grano de caucho mostrados en la Tabla 56.

Tabla 56. Resultados Ensayo Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR.

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %				Variables MARSHALL					Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm (rice)	Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc	Correg.			
4	63.46	1200.0	1202.0	632.0	1.944	A	1994.5	2.378	76.6	2.0	7.2	14.2	0.26	23.4	60.5	3.8	1.52	1000.6	1.003	1003.6	3.81	247.2
	63.43	1191.0	1193.0	627.0	1.943	B	7069.8											950.7	1.003	953.6	3.84	
	63.42	1190.0	1193.0	625.0	1.938	C	8180.6											909.0	1.003	911.7	3.96	
					1.941		2.257															
4.5	65.43	1200.0	1202.0	640.0	1.971	A	1996.3	2.374	77.2	2.1	6.2	14.6	0.12	22.8	63.8	4.4	1.30	1046.4	0.954	998.3	3.38	278.9
	65.37	1198.0	1200.0	638.0	1.968	B	7069.8											955.3	0.956	913.2	3.45	
	65.37	1191.0	1193.0	632.0	1.960	C	8174.5											994.3	0.956	950.5	3.43	
					1.967		2.239															
5	65.74	1198.0	1200.0	636.0	1.961	A	1982.3	2.364	76.5	2.1	5.9	15.5	0.19	23.5	66.1	4.8	1.18	1131.7	0.949	1074.0	3.15	327.7
	65.63	1204.0	1206.0	639.0	1.960	B	7069.8											1082.3	0.951	1029.2	3.20	
	65.63	1200.0	1202.0	637.0	1.961	C	8157.9											1053.2	0.951	1001.6	3.12	
					1.961		2.217															
5.5	64.17	1201.0	1203.0	638.0	1.963	A	1995.4	2.359	76.1	2.1	5.5	16.3	0.36	23.9	68.2	5.2	1.10	1028.3	0.985	1012.9	2.92	332.2
	64.83	1202.0	1204.0	639.0	1.964	B	7069.8											998.4	0.968	966.4	2.97	
	64.83	1198.0	1200.0	634.0	1.954	C	8157.7											988.8	0.968	957.2	2.95	
					1.960		2.199															
6	64.17	1200.0	1202.0	636.0	1.957	A	2000.6	2.356	75.5	2.1	5.3	17.1	0.46	24.5	70.0	5.6	1.02	968.0	0.985	953.4	2.90	318.7
	64.83	1201.0	1203.0	637.0	1.959	B	7069.8											951.6	0.968	921.2	2.92	
	64.83	1200.0	1202.0	635.0	1.954	C	8153.8											940.3	0.968	910.2	2.92	
					1.957		2.183															
6.5	64.17	1202.0	1204.0	641.0	1.971	A	1993.7	2.356	75.5	2.1	4.8	17.7	0.46	24.5	72.1	6.1	0.94	907.6	0.985	894.0	3.00	301.9
	64.83	1200.0	1202.0	637.0	1.961	B	7069.8											911.3	0.968	882.1	3.02	
	64.83	1200.0	1202.0	638.0	1.964	C	8144.5											961.2	0.968	930.4	2.95	
					1.966		2.169															

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos del diseño preliminar se realiza un resumen de las variables necesarias para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto, según los criterios establecidos por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS), en las especificaciones generales de construcción de carreteras. En la Tabla 57 se evidencian los valores para cada uno de los porcentajes de asfalto analizados en laboratorio.

Tabla 57. Resumen Diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5 de GCR.

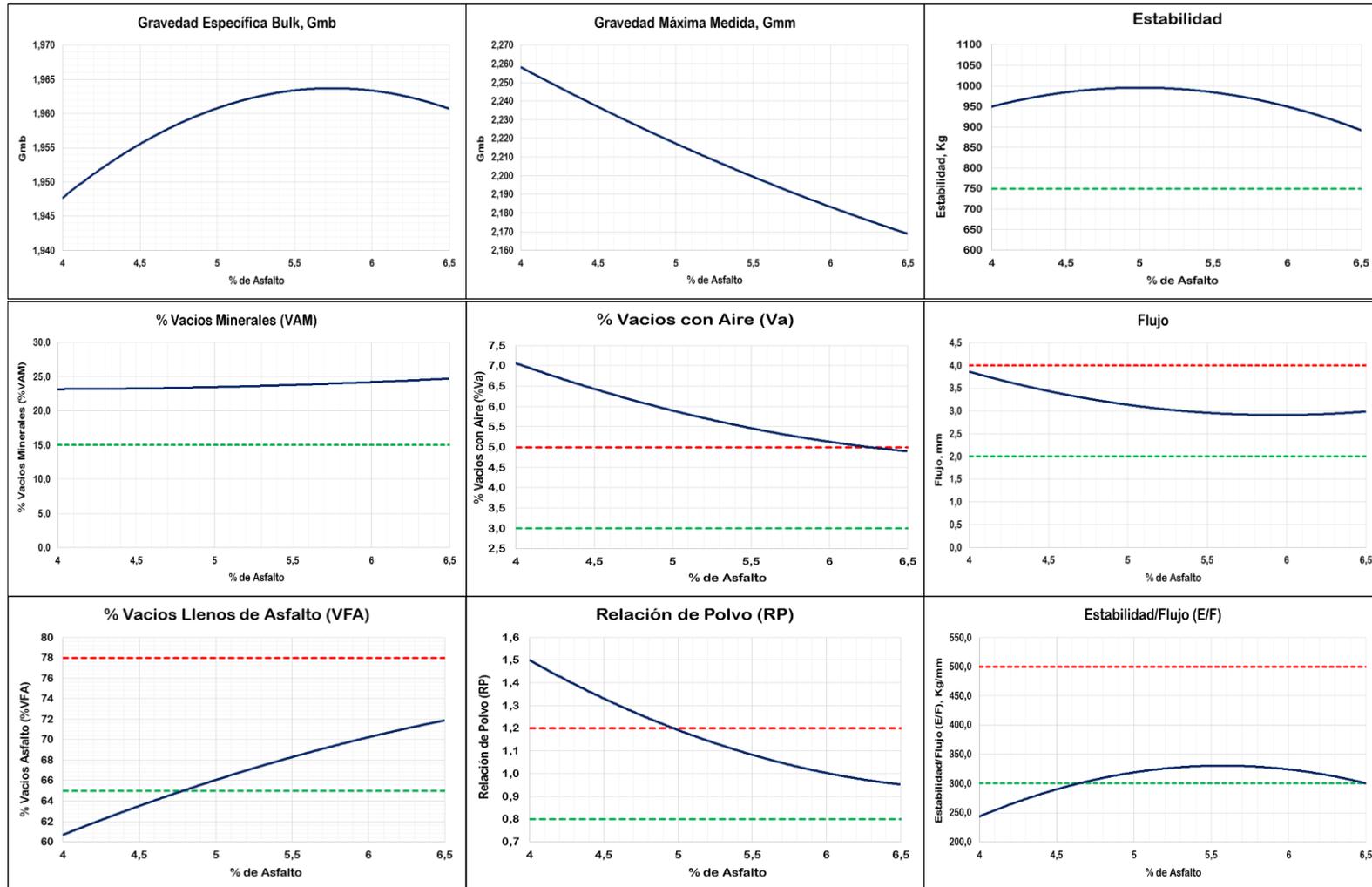
<i>Diseño de Mezclas Asfálticas Metodo Marshall</i>									
% Asfalto	Gmb	Gmm	Estabilidad (Kg)	% Va	Flujo (mm)	% VAM	% VFA	RP	E/F (Kg/mm)
4	1.941	2.257	956	7.20	3.87	23.4	60.5	1.517	247.2
4.5	1.967	2.239	954	6.19	3.42	22.8	63.8	1.299	278.9
5	1.961	2.217	1035	5.89	3.16	23.5	66.1	1.182	327.7
5.5	1.960	2.199	979	5.53	2.95	23.9	68.2	1.103	332.2
6	1.957	2.183	928	5.29	2.91	24.5	70.0	1.022	318.7
6.5	1.966	2.169	902	4.78	2.99	24.5	72.1	0.937	301.9
<i>Especificación</i>	-	-	≥ 750	3 - 5	2 - 4	≥ 15	65 - 78	0.8 - 1.2	300 - 500

Fuente. Elaboración propia

Realizado el procesamiento de la información del Diseño Marshall, se graficó cada una de las variables del diseño contemplados en las especificaciones, en la Figura 39. Se presenta cada una de las variables de análisis para el cálculo del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de GCR.

Para la definición del porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla gráficamente se trazó los rangos de la especificación dentro de cada una de las variables teniendo así; línea de color verde indica el valor mínimo y de igual manera la línea de color rojo indica el valor máximo indicado por las especificaciones.

Figura 39. Variables de diseño Marshall MD-12 con adición de 2.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

El análisis gráfico para la determinación del porcentaje óptimo de asfalto se realiza para una capa de rodadura y un nivel de tránsito T2-T3, de acuerdo a los aspectos mencionados y a las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011 se elabora la Tabla 58 en la que se presenta la determinación del porcentaje óptimo de asfalto para la asfáltica MD-12 con adición de GCR de 2.5%.

Tabla 58. Determinación del óptimo de asfalto MD-12 con 2.5% de GCR.

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO																											
Característica	% Asfalto																										
	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,7	4,8	4,9	5	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,7	5,8	5,9	6	6,1	6,2	6,3	6,4	6,5	
Flujo (mm)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Estabilidad Mínima (Kg)	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
% VAM	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
% Va	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
% VFA	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green																		
E/F (kg/mm)	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green																		
Relación Polvo	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green																	

Fuente. Elaboración propia

De la Tabla 58 se puede establecer el comportamiento de las variables del Diseño Marshall para la mezcla MD-12 modifica con adición de GCR de 2.5%, de lo cual se determina que:

El porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica es de **6.4%**, este valor es determinado mediante las gráficas de las variables Marshall y su respectivo análisis en la Tabla 58. Se puede establecer que cumple todas las especificaciones establecidas por el Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011 en la tabla 510.8 criterios de diseño de la mezcla asfáltica.

Es importante señalar que el porcentaje óptimo de asfalto se calculó como el promedio del rango que cumple todos los requisitos establecidos por las especificaciones IDU 2011, para una capa de rodadura y un nivel de tránsito T2-T3.

Las variables del Flujo, Estabilidad y el porcentaje de Vacíos en el agregado mineral cumplen las especificaciones para todos los porcentajes de asfalto, de igual manera se puede establecer que el porcentaje de vacíos llenos de asfalto cumple las especificaciones después del 4.9% de asfalto hasta el rango máximo de 6.5% de asfalto para el cual se elaboró la mezcla asfáltica.

La variable de relación llenante ligante en la mezcla asfáltica se tiene que cumple criterios de especificación desde el 5.0% de asfalto, la relación estabilidad flujo presenta condiciones óptimas en los porcentajes mayores a 4.7% de asfalto en la mezcla asfáltica, de igual manera se puede determinar que el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica es permisible para los porcentajes mayores a 6.3% de asfalto.

4.4.2 Verificación del diseño preliminar MD-12 con adición de 2.5% GCR. Una vez determinado el valor del porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica de estudio se procede a realizar la verificación del diseño preliminar el cual consiste en la elaboración de tres briquetas con **6.4%** de asfalto, las cuales se evaluarán con las especificaciones del IDU, y así poder dar continuidad con la investigación.

En la Tabla 59 se presentan los valores de las variables Marshall para las briquetas elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla asfáltica con adición del 2.5% de grano de caucho reciclado.

Tabla 59. Resultados verificación MD-12 con adición de 2.5% de GCR

% Asf.	h (mm)	Pesos (gr)			Pesos Especificos			Comp. Volumétrica, %					Variables MARSHALL				Estabilidad (Kg)			Flujo (mm)	E/F (Kg/mm)	
		Seca	Paraf.	Sumg.	Gmb	Gmm (rice)		Gse	Vsb	Vgcr	Va	Vbe	Aa	VAM	VFA	Pbe	RP	Medida	Fc			Correg.
6.4	63.45	1200	1202	639	1.968	A	1996.10	2.359	75.5	2.1	4.9	17.5	0.37	24.5	71.5	6.1	0.939	874.1	1.003	876.7	3.02	300.8
	63.42	1197	1199	635	1.960	B	7069.80											908.5	1.003	911.3	2.90	
	63.46	1199	1201	638	1.966	C	8147.90											883.6	1.003	886.2	2.97	
					1.965		2.174															

Fuente. Elaboración propia

Realizados los cálculos Marshall a la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de GCR con porcentaje óptimo de asfalto de 6.4%, se elaboró la Tabla 60 en la cual se presenta la evaluación y criterio de aceptación de acuerdo a las especificaciones IDU para una mezcla asfáltica densa en caliente MD-12 para un nivel de tránsito T2-T3.

Tabla 60. Resultados verificación MD-12 con adición de 2.5% de GCR.

Verificación de la Mezcla Asfáltica MD-12 con 2.5% GCR			
% Óptimo de Asfalto		6.4	
Gravedad Específica Bulk, Gmb		1.965	
Gravedad Específica Máxima, Gmm		2.174	
Variable	Requisito IDU (T2 - T3)	Valor Obtenido	Observación
Flujo (mm)	2.0 - 4.0	2.96	CUMPLE
Estabilidad (Kg)	≥ 750	891	CUMPLE
% Va (Rodadura)	3.0 - 5.0	4.91	CUMPLE
% VAM (Mezclas 12)	≥ 15	24.5	CUMPLE
% VFA	65 - 78	71.5	CUMPLE
Relación Polvo	0.8 - 1.2	0.939	CUMPLE
E/F (Kg/mm)	300 - 500	300.8	CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

4.4.3 Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 2.5% de GCR. Según lo estipulado en las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011, se debe realizar el análisis de verificación del Índice de película de asfalto, este parámetro define el valor del espesor de la película de asfalto que cubre los agregados combinados el cual de acuerdo a las especificaciones debe ser mínimo 7.5 μm (micrómetros). En la Tabla 61 se presentan los resultados obtenidos de la verificación del índice IPA.

Tabla 61. Verificación Índice de Película de Asfalto MD-12 con 2.5% de GCR.

Índice de Película de Asfalto, IPA		
% Óptimo de Asfalto		6.4%
Asfalto Efectivo, Pbe		6.07%
Gravedad Específica Asfalto, Gb		1.014
Gravedad Específica Agregados, Gsb		2.37
Parametro		Valor
Granulometría	% Pasa Tamiz N° 4	56.4
	% Pasa Tamiz N° 8	42
	% Pasa Tamiz N° 16	32
	% Pasa Tamiz N° 30	24
	% Pasa Tamiz N° 50	15
	% Pasa Tamiz N° 100	10
	% Pasa Tamiz N° 200	5.7
Superficie Específica Agregado, m^2/Kg		6.22
Índice de Película de Asfalto, IPA		9.20
Observación		CUMPLE

Fuente. Elaboración propia

El índice de película de asfalto (IPA) obtenido para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 2.5% de grano de caucho reciclado es de 9.20 μm , evaluado con el valor mínimo estipulado por las especificaciones se puede determinar que **Cumple** este criterio de verificación.

4.4.4 Verificación Adherencia MD-12 con adición de GCR de 2.5%. De igual manera para la verificación de la Adherencia de la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de grano de caucho reciclado, se realizó de acuerdo a lo mencionado en la norma de Ensayo Invias INV.E 725-13. Para la verificación de la Adherencia también es necesario realizar la evaluación del grado de saturación de las briquetas en condición húmedo, los resultados de esta verificación se presentan en la Tabla 62.

Tabla 62. Comprobación de saturación MD-12 con adición de GCR de 2.5%

GCR 2.5%	Briqueta	Alt.	Diam.	Peso sss	Peso Sumg.	(B-C) cm ³	%VA	VA	Peso Aire	V _{wa}	% Saturación
	Seco	1	63.31	101.36	1194	673	521	4.92	-	1190	-
2		63.46	101.49	1201	677	524	4.91	-	1197	-	-
3		63.42	101.44	1204	680	524	4.86	-	1200	-	-
Humedo	4	63.10	101.23	1200	674	526	4.82	9.55	1193	7	78.3
	5	63.26	101.31	1206	678	528	4.90	8.52	1200	6	77.4
	6	63.18	101.25	1204	679	525	4.85	5.52	1200	4	76.5

Fuente. Elaboración propia

La norma de ensayo estipula que el porcentaje de saturación debe encontrarse en el rango de 55% al 80%, como se observa en la tabla 62 este grupo de briquetas con adición de 2.5% de GCR cumple este criterio, por lo que se procede a realizar el ensayo de tracción indirecta, sometiendo las briquetas a cargas, obteniendo los siguientes resultados presentados en la Tabla 63.

Tabla 63. Cargas máximas tracción indirecta MD-12 con adición de 2.5%

GCR 2.5%	Briqueta	Diam. (mm)	Alt. (mm)	Carga (N)
	Seco	1	101.36	63.31
2		101.49	63.46	8945
3		101.44	63.42	8741
Humedo	4	101.23	63.10	8247
	5	101.31	63.26	8105
	6	101.25	63.18	8016

Fuente. Elaboración propia

A partir de los datos registrados de carga se procede a calcular la resistencia retenida para cada uno de los grupos ensayados (húmedo y seco), luego se calcula una relación entre las dos para obtener la relación de resistencias a la tensión, dichos valores se presentan en la Tabla 64.

Tabla 64. Relación de resistencias MD-12 con adición de 2.5% de GCR.

GCR 2.5%	RTS (kPa)	RTH (kPa)	RRT	Obs.
	861.97	808.23	93.8%	Cumple

Fuente. Elaboración propia

El criterio de verificación de la adherencia en mezclas asfálticas por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), exige que la relación de resistencias debe ser superior al 80%, según lo presentado anteriormente se establece que la mezcla asfáltica tipo MD-12 con adición de GCR de 2.5% cumple satisfactoriamente este parámetro de verificación.

Para la realización de una inspección visual de la briqueta en su composición interna se aplica carga hasta fracturarla, en la Figura 40 se observa estas propiedades de adherencia en las briquetas, se puede determinar visualmente el recubrimiento es el adecuado entre el asfalto y los agregados por su color homogéneo en toda la briqueta, además se puede establecer que la adherencia es adecuada ya que no se observan partículas considerablemente fracturadas.

Figura 40. Composición Interna MD-12 con adición de 2.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

4.4.5 Fórmula de Trabajo Mezcla Asfáltica MD-12 con adición de GCR de 2.5%.

Luego de realizar la verificación correspondiente al contenido óptimo de asfalto y que este cumpliera con las especificaciones definidas por el IDU en las especificaciones de construcción 2011, se procede a definir la fórmula de trabajo de la mezcla asfáltica la cual se presenta a continuación en la Tabla 65.

Tabla 65. Fórmula de trabajo MD-12 con adición de 2.5% GCR

Fórmula de Trabajo		
<i>Tipo de Mezcla</i>		MD – 12
<i>Cemento Asfáltico</i>		AC 80-100
<i>Granulometría</i>	<i>Grava</i>	43.6%
	<i>Fino</i>	48.2%
	<i>Filler</i>	5.7%
	<i>GCR</i>	2.5%
<i>Contenido de Asfalto</i>		6.4%
<i>Densidad de diseño, g/cm³</i>		1.965
<i>Temperatura, °C</i>	<i>Mezclado</i>	144 ± 3
	<i>Compactación</i>	134 ± 2

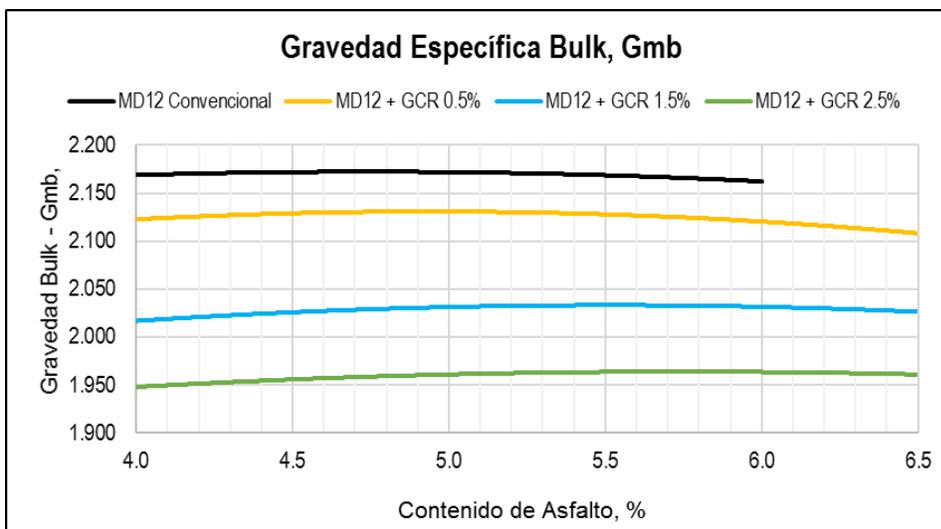
Fuente. Elaboración propia

4.5 RESUMEN DISEÑO PRELIMINAR MEZCLA ASFÁLTICA MD-12 MÉTODO MARSHALL

Se finalizó el diseño de cada una de las mezclas asfálticas de análisis, para cada una de ellas se ha definido un contenido de asfalto óptimo, el cual ha sido verificado realizando ensayos de estabilidad, flujo, adherencia, índice de película asfáltica, con los cuales se ha evidenciado el cumplimiento satisfactorio de cada una de las mezclas asfálticas, tanto la convencional como las que tienen adición de grano de caucho reciclado por vía seca. A continuación, se realizará una comparación con los resultados obtenidos en el diseño Marshall con cada una de las variables.

4.5.1 Resumen gravedad específica bulk, Gmb. La gravedad específica bulk es una variable importante que se utiliza en la determinación de la composición volumétrica de la mezcla asfáltica en estado compacto, a continuación, se presentan los resultados obtenidos de esta variable en cada una de las mezclas asfálticas de análisis, a partir de estos se realiza una gráfica para una mejor visualización de los resultados obtenidos y de esta manera poder analizar el comportamiento de la gravedad específica bulk en función de la adición de grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica tipo MD-12 como se presenta en la Gráfica 8.

Gráfica 8. Resultados gravedad específica Bulk



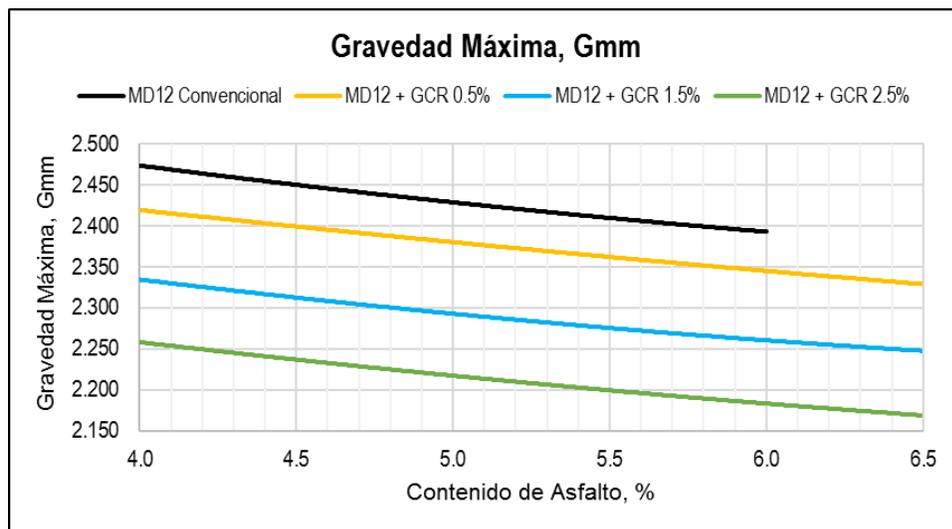
Fuente. Elaboración propia

En la Gráfica 8 se observa como la gravedad específica bulk disminuye cada que se va aumentando la proporción en la cual se adiciona el grano de caucho reciclado, siendo la mezcla asfáltica con un 2.5% de grano de caucho la que menor gravedad específica bulk presenta, manteniendo en todas las mezclas asfálticas el

comportamiento típico de la curva Gmb, la cual aumenta hasta un punto máximo en el cual empieza a disminuir debido al contenido de asfalto presente en la mezcla.

4.5.2 Resumen gravedad específica máxima, Gmm. La gravedad específica máxima medida se obtiene a partir del ensayo de extracción de vacíos por el método Rice, este sirve para evaluar la gravedad específica de la mezcla asfáltica en estado suelto extrayendo los vacíos con aire de la misma, generalmente esta variable disminuye a medida que el contenido de asfalto aumenta como se presenta en la Gráfica 9.

Gráfica 9. Resultados gravedad especifica máxima



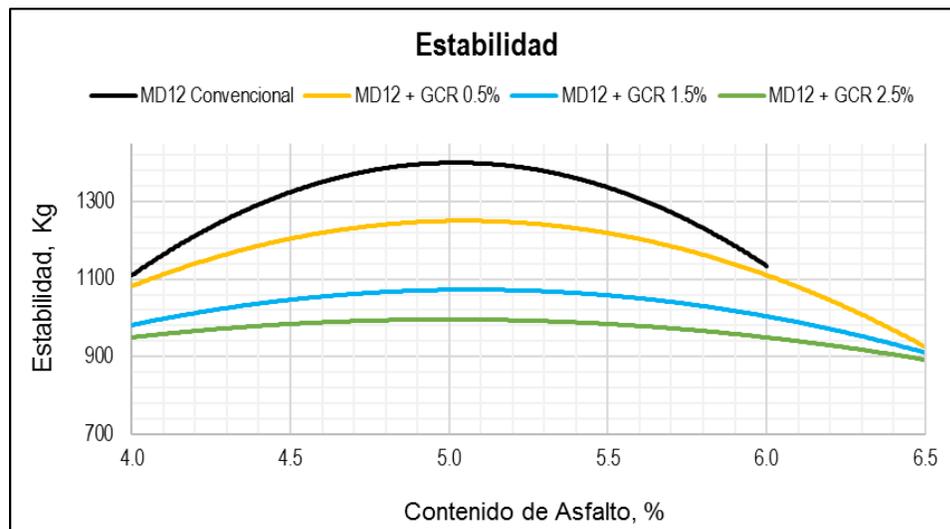
Fuente. Elaboración propia

En la Gráfica 9 se observa que las curvas de gravedad especifica máxima para cada una de las mezclas asfálticas de estudio presentaron el comportamiento típico esperado de esta propiedad, es decir tienen una tendencia decreciente, ahora en cuanto a la adición de grano de caucho reciclado se observa como al igual que la variable anterior Gmb, en cuanto mayor sea el porcentaje de grano de caucho reciclado que se adicione a la mezcla, la gravedad especifica máxima Gmm se verá disminuida en aproximadamente el 10% entre la mezcla asfáltica MD-12 convencional y la que mayor adición de grano de caucho tiene que es la MD-12 con un 2.5% de GCR.

4.5.3 Resumen Estabilidad. La estabilidad es una variable que está asociada a la resistencia de la mezcla asfáltica ante la aplicación de una carga perpendicular, de igual manera está asociada a la capacidad de resistencia a la deformación, se espera que la estabilidad obtenga un punto máximo y a partir de ese empiece a disminuir a medida que se aumente el contenido de asfalto presente en la mezcla asfáltica.

En la Gráfica 10 se cómo efectivamente, la estabilidad disminuye con el aumento del contenido de asfalto en cada una de las mezclas asfálticas diseñadas encontrando el punto máximo hacia el punto medio de los porcentajes de asfalto trabajados, ahora comparando la mezcla asfáltica MD-12 convencional con las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado se observa como a medida que el porcentaje de GCR es mayor, la estabilidad presenta una disminución en sus valores aunque las curvas no son tan pronunciadas.

Gráfica 10. Resultados Estabilidad



Fuente. Elaboración propia

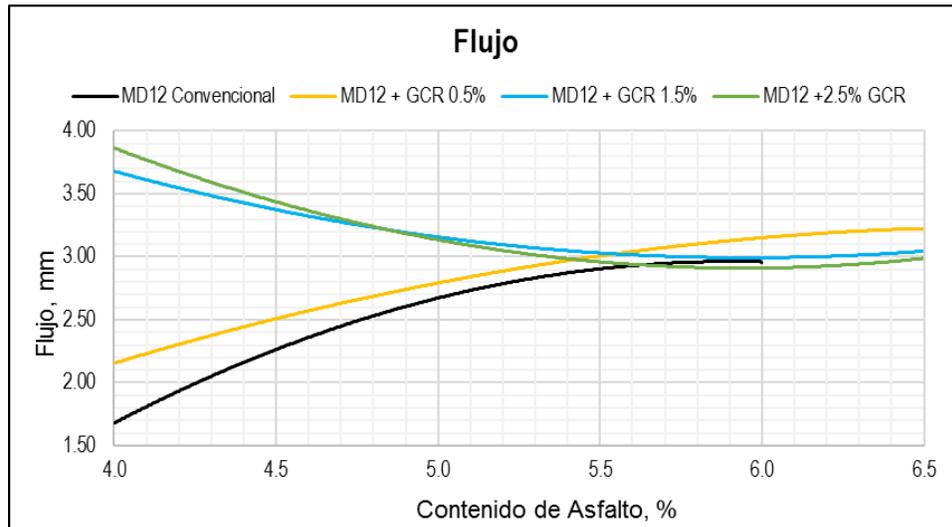
Debido a que fue necesario aumentar el contenido de asfalto para las mezclas asfálticas con grano de caucho, se observa como la estabilidad en la mezcla asfáltica convencional podría llegar a cortar con las curvas de estabilidad de las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho, lo que ratifica que la estabilidad es susceptible al contenido de asfalto.

4.5.4 Resumen flujo. Otra variable que se obtiene al emplear la prensa Marshall de acuerdo a la norma de ensayo INV. E-748-13, es el flujo que representa la deformación que sufre el espécimen compactado ante la aplicación de la carga perpendicular, para mezclas asfálticas convencionales el valor del flujo tiende a incrementar a medida que se aumentan los contenidos de asfalto en la mezcla asfáltica. A continuación, se presenta el comportamiento del flujo en cada una de las mezclas asfálticas diseñadas.

En la Gráfica 11 se observan las curvas de flujo obtenidas para cada una de las mezclas asfálticas, en estas se observa como la MD-12 convencional sigue el comportamiento típico que hace referencia a que el flujo aumenta de manera directamente proporcional con el aumento en el contenido de asfalto. La mezcla

asfáltica MD-12 con adición del 0.5% de grano de caucho presenta la misma tendencia, aunque los valores de flujo obtenidos son mayores en aproximadamente 0.3 milímetros en promedio.

Gráfica 11. Resultados Flujo



Fuente. Elaboración propia

Para las mezclas asfálticas con una mayor adición de grano de caucho como lo son 1.5% y 2.5% se observa un comportamiento diferente a las otras dos mezclas, estas empiezan con un valor máximo para el menor contenido de asfalto de 4% y el flujo tiende a disminuir a medida que el contenido de asfalto aumenta, a partir del 6% de asfalto el flujo asciende y puede que mantenga esa tendencia creciente de ahí en adelante a mayores contenidos de asfalto.

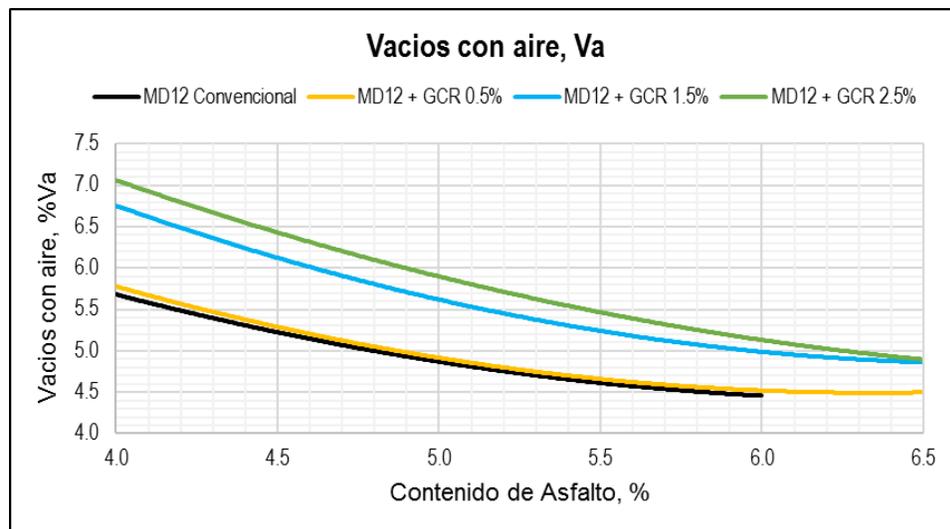
Se observa como la curva de flujo de la MD-12 con 1.5% de GCR es menor que el flujo presentado para la MD-12 con 2.5% de GCR, hasta el valor de aproximadamente 4.8% de asfalto en el cual las dos curvas se intersectan y el flujo de la mezcla asfáltica con 1.5% de GCR pasa a ser mayor. De igual manera se observa como a partir del 5.5% de asfalto las curvas se cortan entre sí, a partir de este contenido de asfalto la mezcla asfáltica tipo MD-12 con adición del 2.5% de grano de caucho reciclado pasa a ser la mezcla asfáltica con menores valores registrados de flujo.

4.5.5 Resumen vacíos con aire, %Va. El contenido de vacíos con aire en una mezcla asfáltica es quizá la variable más importante en el diseño, debido a que es una variable de peso en la definición del contenido óptimo de asfalto, de igual manera se utiliza para definir el tipo de mezcla, en los vacíos con aire se espera que a medida que se presente mayor contenido de asfalto en la mezcla asfáltica, los

valores de vacíos expresados en porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica sean menores.

Como se observa en la Gráfica 12 los mayores porcentajes de vacíos se presentan a contenidos bajos de cemento asfáltico, esto se debe a que, a mayor asfalto y a sus altas temperaturas de mezclado, este es más fluido y ocupa la mayoría de espacios entre agregados pétreos. Todas las curvas presentan el comportamiento esperado en tendencia decreciente, observando que para las mezclas asfálticas con grano de caucho en 1.5% y 2.5% los vacíos tienden a ser iguales para contenidos de asfalto superiores al 6%.

Gráfica 12. Resultados Vacíos con aire

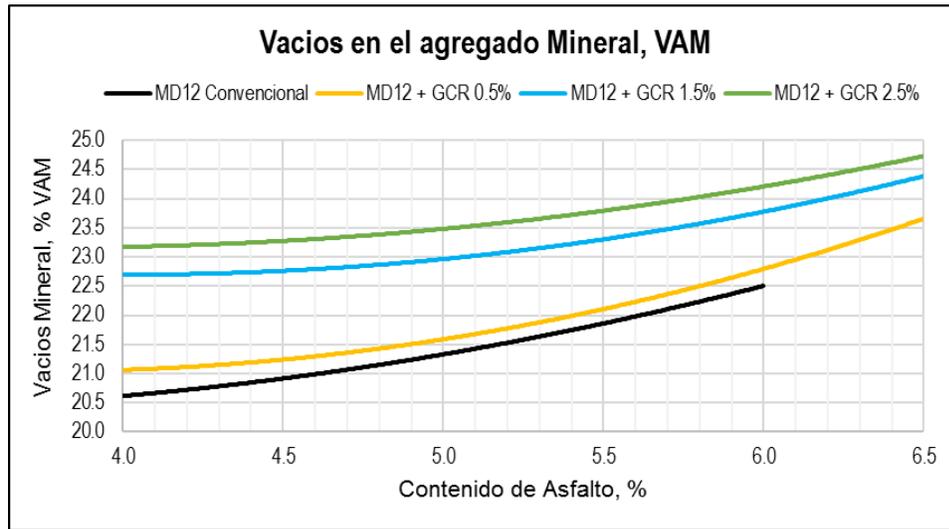


Fuente. Elaboración propia

Se observa que la mezcla asfáltica convencional presenta valores de vacíos con aire menores que la mezcla asfáltica con adición del 0.5% de grano de caucho reciclado, aunque esta diferencia no es muy notoria y en promedio ambas mezclas presentan el mismo comportamiento, lo cual se evidenciara más adelante con la verificación de las mezclas asfálticas con contenidos óptimos de asfalto

4.5.6 Resumen vacíos en los agregados minerales, %VAM. Para un mejor análisis de los vacíos en los agregados minerales en las mezclas asfálticas de estudio en la investigación se realizó la Gráfica 13, de la que se observa que aumentan a medida que aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica, así mismo se establece que la adición de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica aumenta los vacíos en los agregados minerales de la mezcla asfáltica.

Gráfica 13. Resultados Vacíos en los agregados minerales



Fuente. Elaboración propia

Los valores obtenidos de los vacíos en los agregados minerales son similares para las mezclas asfálticas convencional y la de adición de 0.5% de GCR, los cuales aumentan a medida que aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica.

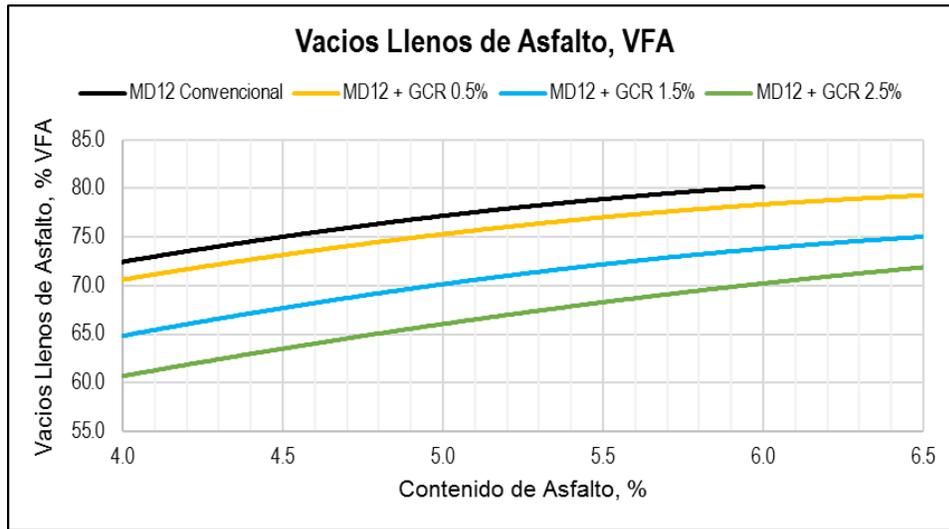
Se puede establecer que la adición de grano de caucho reciclado aumenta los valores de vacíos en los agregados minerales, ya que existe un aumento evidente para las mezclas asfálticas con mayores porcentajes de GCR, las cuales presentan un comportamiento similar en su estructura en cuanto a los vacíos en el agregado mineral, y presentan una tendencia similar a medida que se aumenta el valor del porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica.

4.5.7 Resumen vacíos llenos de asfalto, %VFA. El comportamiento de la variable de los vacíos llenos de asfalto en el diseño preliminar para las diferentes mezclas asfálticas de análisis en la investigación se presenta en la Gráfica 14 de la cual se puede analizar que:

La presencia de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica disminuye los vacíos llenos de asfalto, así mismo que a medida que aumenta el porcentaje de asfalto aumenta este valor.

Las mezclas asfálticas convencional y la que contiene adición de GCR de 0.5% presentan resultados de vacíos llenos de asfalto similares, de igual manera sucede para las mezclas asfálticas con mayor contenido de grano de caucho reciclado.

Gráfica 14. Resultados Vacíos llenos de asfalto



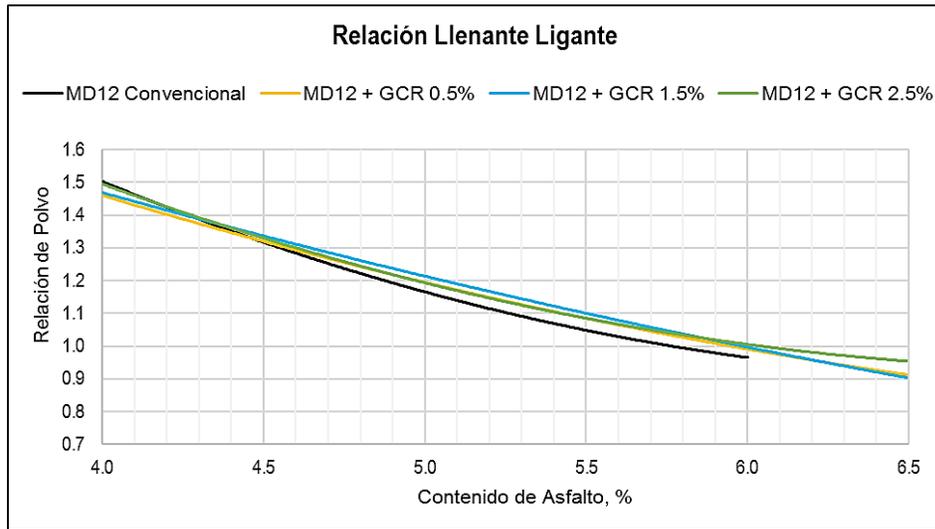
Fuente. Elaboración propia

Se puede determinar que se presenta una disminución en la relación llenante ligante y con la misma proporción a medida que aumenta el porcentaje de GCR en la mezcla asfáltica, por lo que se mencionó anteriormente que para las mezclas asfálticas sin contenido de GCR y 0.5% este valor es similar, y para las mezclas con mayores porcentajes de GCR disminuye en las mismas proporciones a medida que se aumenta el porcentaje de asfalto.

4.5.8 Resumen relación llenante ligante. Esta variable se determina en función del porcentaje pasa 200 y del porcentaje de asfalto efectivo, ya que para todas las mezclas se evaluaron con la misma granulometría y el peso del asfalto efectivo obtenido es similar se obtuvieron valores de la relación llenante ligante aproximadamente iguales como se muestra en la Gráfica 15.

Como se mencionó anteriormente y se puede observar en la Gráfica 15 los resultados obtenidos en el diseño preliminar de la variable relación llenante ligante son similares para todas las mezclas asfálticas de estudio, de lo cual se puede establecer que esta variable disminuye a medida que aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica.

Gráfica 15. Resultados Relación llenante ligante

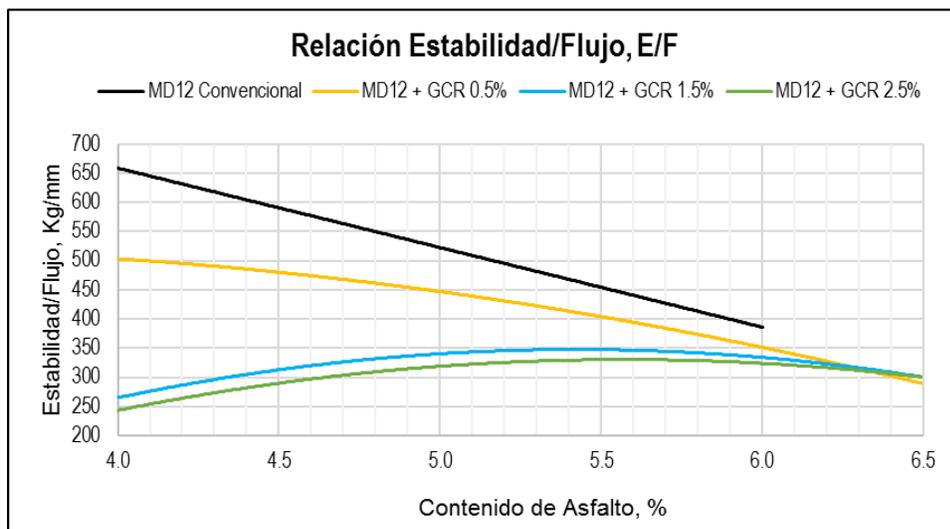


Fuente. Elaboración propia

La mezcla asfáltica convencional presenta una leve disminución en la relación llenante ligante para el rango de asfalto entre 4.5% y 6.0%, respecto a las mezclas asfálticas con adición de GCR.

4.5.9 Resumen relación estabilidad-flujo, E/F. La relación de la estabilidad y flujo representa la tendencia de la deformación de la mezcla asfáltica a medida que se aplican las cargas, para el análisis de esta variable en el diseño preliminar se realizó la Gráfica 16, en la cual se observa el comportamiento para cada una de las mezclas asfálticas de estudio en la investigación.

Gráfica 16. Resultados Relación Estabilidad-Flujo



Fuente. Elaboración propia

De la Gráfica 16 se puede analizar que la relación estabilidad-flujo disminuye a medida que se le adiciona grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica, así mismo se puede determinar que para las mezclas con adición de GCR esta variable tiende a ser igual a medida que se aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica, por lo cual se tiene que para las mezclas asfálticas con adición de GCR y porcentajes de asfalto mayores a 6.0% el valor de la relación estabilidad flujo es casi el mismo.

En cuanto a la mezcla convencional se tiene una tendencia lineal descendente, lo que establece que el valor máximo de la relación estabilidad-flujo se tiene para el porcentaje de asfalto más bajo de la mezcla en análisis, y a medida que se aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla este disminuye.

Al comparar la mezcla asfáltica convencional con las mezclas asfálticas con adición de GCR, se tiene que para todos los porcentajes de asfalto ensayados en el diseño preliminar el valor de la estabilidad-flujo es mayor para la mezcla convencional, y así mismo al analizar la tendencia de la mezcla convencional al poseer porcentajes mayores a 6.0% de asfalto se aproxima a los valores obtenidos para las mezclas asfálticas con adición de GCR.

5. RESUMEN VALORES ÓPTIMOS VERIFICACIÓN DISEÑO MARSHALL

Una vez realizada la verificación del diseño preliminar de cada una de las mezclas asfálticas, se logró el cumplimiento de los requisitos en cada una de las variables que hacen parte del diseño Marshall de una mezcla asfáltica, de acuerdo a lo indicado por las especificaciones de construcción del Instituto de Desarrollo Urbano IDU 2011, con lo cual se logran obtener las fórmulas de trabajo de cada mezcla asfáltica que se ha trabajado en la presente investigación.

En este capítulo se presentará una comparación y un análisis de como el grano de caucho reciclado influye en el comportamiento de cada una de las variables contempladas en el diseño de una mezcla asfáltica, esta comparación se realizará con los resultados obtenidos en las mezclas asfálticas con contenido óptimo de asfalto, las cuales fueron verificadas cumpliendo satisfactoriamente con las especificaciones de construcción del IDU 2011.

5.1 VARIACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO

La primera comparación se realizará con el contenido de asfalto determinado como el óptimo para cada una de las mezclas asfálticas, este contenido óptimo de asfalto se definió en base a las especificaciones del IDU, obteniendo los valores presentados en la Tabla 66.

Tabla 66. Contenido óptimo de asfalto en función de la adición de GCR

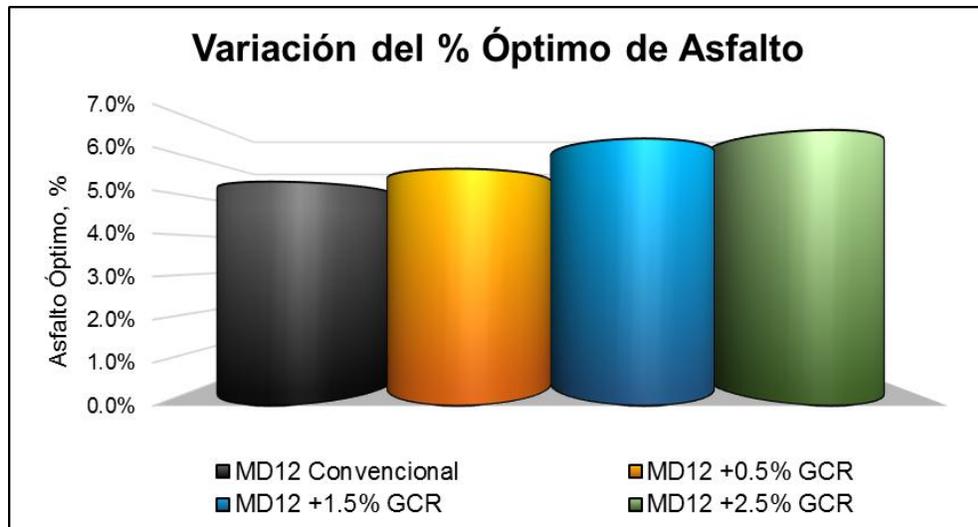
Óptimo de Asfalto	MD-12	% Asfalto
	Convencional	5.2%
GCR 0.5%	5.5%	
GCR 1.5%	6.2%	
GCR 2.5%	6.4%	

Fuente. Elaboración propia

A partir de estos resultados se realizara una gráfica que refleje el comportamiento del contenido óptimo de asfalto en función de la proporción en la cual se adicionó el grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, en la Gráfica 17 se observa como el menor contenido de asfalto se presenta en la mezcla asfáltica convencional obteniendo un valor de 5.2% que se considera un valor típico de acuerdo con el tipo de mezcla asfáltica, su dosificación granulométrica y el cemento asfáltico empleado, a partir de este valor se realizara la comparación para las diferentes mezclas de análisis.

Principalmente se observa como el contenido óptimo de asfalto va aumentando a medida que la proporción en que se adiciona el grano de caucho es mayor, obteniendo que el contenido de asfalto mayor lo presenta la mezcla asfáltica MD-12 con un 2.5% de GCR teniendo un óptimo de 6.4% de asfalto, que comparado con la MD-12 convencional representa un aumento del 23% en su contenido óptimo de asfalto.

Gráfica 17. Contenido óptimo de asfalto en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

Para presentar unas propiedades gravimétricas y volumétricas que estén acordes a la especificación cumpliendo todos los requisitos exigidos por el IDU, la mezcla asfáltica MD-12 con una adición del 0.5% de grano de caucho reciclado requiere de 5.5% de asfalto, lo que significa un aumento del 6% en el contenido óptimo de asfalto respecto a la mezcla asfáltica MD-12 convencional, por último para la mezcla asfáltica MD-12 con una adición del 1.5% de GCR se obtuvo un contenido de asfalto del 6.2%, es decir un 13% más de asfalto que la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional.

Este aumento del contenido óptimo de cemento asfáltico cada que se adiciona el grano de caucho reciclado en mayor proporción, puede llegar a ser un factor negativo debido a que si la mezcla asfáltica tiene un contenido alto de cemento asfáltico la mezcla puede llegar a presentar menor rigidez y mayor susceptibilidad a la fatiga y a las deformaciones.

5.2 VARIACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA BULK

Sobre las mezclas asfálticas se realiza la determinación de su gravedad específica bulk la cual es importante en la determinación de la composición volumétrica de la mezcla asfáltica, la gravedad específica bulk hace referencia a una propiedad gravimétrica en la cual se evalúa la mezcla asfáltica compacta, incluyendo todos sus componentes como son: agregados, asfalto, aire y para la presente investigación, el grano de caucho. A continuación, en la tabla 67 se presentan los resultados obtenidos para esta variable en cada una de las mezclas asfálticas de análisis.

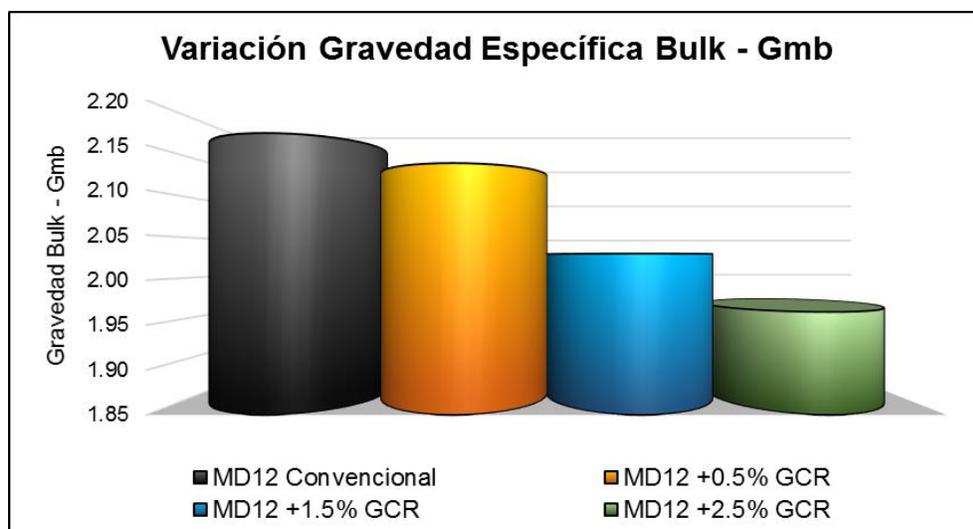
Tabla 67. Gravedad específica Bulk en función de la adición de GCR

Gmb	MD-12	% Asfalto	Gmb
	Convencional	5.2%	2.164
	GCR 0.5%	5.5%	2.130
	GCR 1.5%	6.2%	2.030
	GCR 2.5%	6.4%	1.965

Fuente. Elaboración propia

A partir de estos valores se realiza la Gráfica 18 la cual permite visualizar de manera clara los resultados para cada mezcla asfáltica y de esta manera realizar un análisis más adecuado en cuanto al comportamiento de la gravedad específica bulk en función de la adición de grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica tipo MD-12.

Gráfica 18. Gravedad específica Bulk en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

En esta gráfica se observa como la gravedad específica bulk va disminuyendo a medida que se adiciona una mayor proporción de grano de caucho reciclado, para la mezcla asfáltica MD-12 con un 0.5% de GCR la disminución en su gravedad específica bulk, es de tan solo el 1.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional, lo cual sigue marcando la tendencia de que estas dos mezclas son similares en cuanto a sus propiedades gravimétricas y volumétricas analizadas hasta el momento.

Por otra parte, las mezclas con adiciones de grano de caucho superiores presentan gravedades específicas considerablemente menores respecto a los valores obtenidos en la mezcla asfáltica MD-12 convencional, la MD-12 con adición de 1.5% de GCR tiene una gravedad específica bulk 6.2% menor que la MD-12 convencional. Lo mismo ocurre para la MD-12 con un 2.5% de GCR la cual tiene una gravedad específica bulk aproximadamente 9% menor que la mezcla asfáltica de referencia.

Esta disminución del valor de la gravedad específica bulk a medida que se va incrementando la proporción en la que se adiciona el grano de caucho reciclado, se debe principalmente a que este material tiene una densidad de 0.5 g/cm³, la cual puede llegar a ser hasta cinco veces menor que la densidad del agregado fino que se está reemplazando en la granulometría de la mezcla asfáltica, lo cual hace que el grano de caucho ocupe un mayor volumen y por ende la mezcla asfáltica aunque conserve la misma masa, el volumen ocupado será mayor, por lo cual la gravedad específica tiende a disminuir a medida que se aumente la proporción de grano de caucho reciclado.

5.3 VARIACIÓN DE LA ESTABILIDAD

La estabilidad es una medida asociada a la resistencia a la compresión diametral de la mezcla asfáltica ante la aplicación de una carga diametral, luego de verificar las mezclas asfálticas se obtuvieron los valores de estabilidad registrados en la Tabla 68.

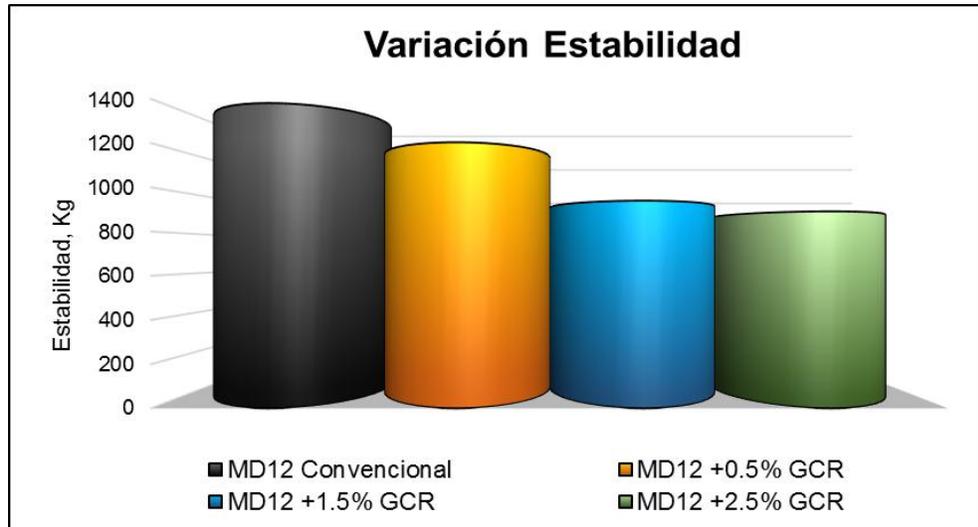
Tabla 68. Estabilidad en función de la adición de GCR

Estabilidad Kg	MD-12	% Asfalto	Estabilidad
	Convencional	5.2%	1381
	GCR 0.5%	5.5%	1204
	GCR 1.5%	6.2%	940
	GCR 2.5%	6.4%	891

Fuente. Elaboración propia

Teniendo en cuenta que a la estabilidad se le aplicó una corrección por la altura del espécimen, a partir de estos valores obtenidos para representar de manera más clara el comportamiento que tiene la estabilidad en función de la adición de grano de caucho reciclado que se realiza a la mezcla asfáltica mediante vía seca, se elabora la Gráfica 19 que se muestra a continuación.

Gráfica 19. Estabilidad en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

Para todas las mezclas asfálticas diseñadas se obtienen estabilidades que superan el requisito mínimo establecido por el IDU de 750 Kg, por lo cual la estabilidad no tendría inconveniente en cuanto a la adición del grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, por otra parte, se observa como la estabilidad se ve disminuida cada que la proporción de grano de caucho adicionada a la mezcla asfáltica es mayor, siendo la mezcla asfáltica MD-12 convencional la que presenta la mayor estabilidad.

La estabilidad presentada por la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% de grano de caucho reciclado es muy similar a la obtenida para la mezcla asfáltica con una adición de 2.5% ya que tan solo varían en aproximadamente 50 Kg algo así como el 3%. Por último, la mezcla asfáltica MD-12 con una adición de 0.5% de grano de caucho reciclado presenta una disminución del 13% de su estabilidad respecto al valor obtenido en la mezcla asfáltica convencional.

Este comportamiento puede presentarse debido a los altos contenidos de asfalto que requieren las mezclas asfálticas con adiciones de grano de caucho mayor, así como por los valores de volumen de vacíos con aire presentes en estas mezclas asfálticas.

5.4 VARIACIÓN DEL FLUJO

El flujo es una variable asociada a la deformación que sufre la mezcla asfáltica compactada en laboratorio mediante la aplicación de carga en la prensa Marshall, los valores de flujo obtenidos en cada una de las mezclas asfálticas que se diseñaron y verificaron se encuentran registrados en la Tabla 69.

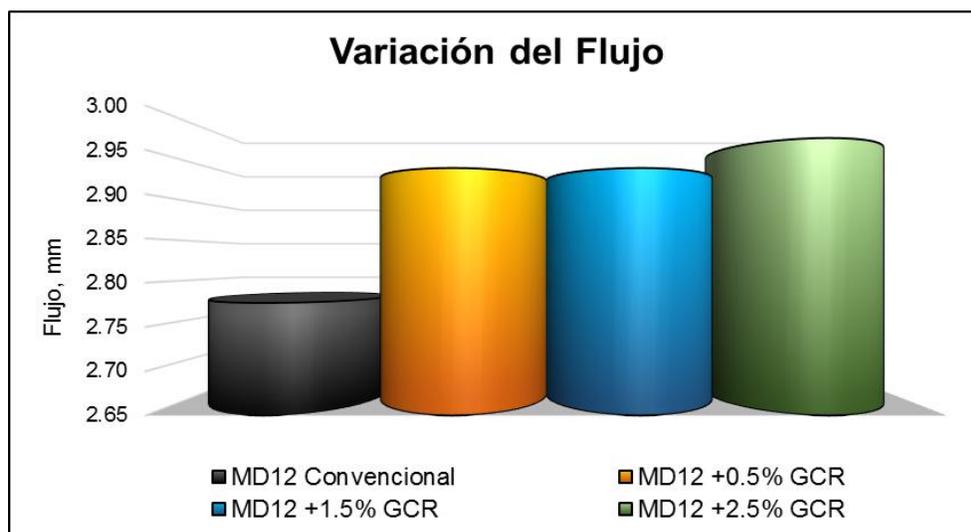
Tabla 69. Flujo en función de la adición de GCR

Flujo mm	MD-12	% Asfalto	Flujo
	Convencional	5.2%	2.777
	GCR 0.5%	5.5%	2.929
	GCR 1.5%	6.2%	2.929
	GCR 2.5%	6.4%	2.963

Fuente. Elaboración propia

A partir de estos valores de flujo que se encuentran expresados en milímetros, se procede a realizar una gráfica de comparación para poder analizar de manera adecuada el comportamiento de esta variable ante la adición por vía seca de grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, en la Gráfica 20 se presenta la variación del flujo en función de la adición de grano de caucho reciclado.

Gráfica 20. Flujo en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

Se puede observar que la mezcla asfáltica que mejores condiciones presenta en cuanto a la variable de flujo es la mezcla asfáltica MD-12 convencional con un valor de 2.777 mm, siendo el menor valor registrado de las cuatro mezclas asfálticas analizadas.

El valor del flujo para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 0.5% de grano de caucho reciclado presenta un incremento del 5.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional, particularmente de la misma manera ocurre con la mezcla asfáltica a la cual se adiciono un 1.5% de grano de caucho reciclado, en general las tres mezclas con adición de grano de caucho presentaron una mínima variación de flujo entre ellas, sin alcanzar los 0.2 milímetros de diferencia respecto a la mezcla asfáltica convencional. Este aumento mínimo del flujo está relacionado directamente con el contenido de asfáltico de cada una de las mezclas asfálticas.

5.5 VARIACIÓN DE LOS VACÍOS CON AIRE

Como se ha venido mencionando una de las características de mayor relevancia en el diseño y definición de una mezcla asfáltica en caliente es la propiedad de los vacíos con aire expresados como porcentaje del volumen total de la mezcla asfáltica, los cuales se pueden definir como esos espacios que quedan entre los agregados recubiertos de asfalto, cabe resaltar que para que se considere una mezcla densa, estos valores de vacíos deben ser inferiores al 10%. Ahora bien, luego de realizar los diseños de las mezclas asfálticas por el método Marshall se obtuvieron los valores de vacíos con aire registrados en la Tabla 70.

Tabla 70. Vacíos con aire en función de la adición de GCR

	MD-12	% Asfalto	% Va
% Va	Convencional	5.2%	4.84
	GCR 0.5%	5.5%	4.55
	GCR 1.5%	6.2%	4.87
	GCR 2.5%	6.4%	4.91

Fuente. Elaboración propia

Para poder realizar una comparación y análisis más adecuado se realiza una gráfica en la cual se observa la variación del porcentaje de vacíos con aire en función tanto del contenido óptimo de asfalto de la mezcla asfáltica, así como de la adición de grano de caucho reciclado a la misma. De acuerdo con esto, la Gráfica 21 presenta el comportamiento de los vacíos con aire en la mezcla asfáltica.

En esta gráfica se observa un comportamiento que vale la pena resaltar, anteriormente al realizar la comparación entre mezclas asfálticas y sus curvas de diseño completas se observaba como el porcentaje de vacíos con aire entre la

mezcla asfáltica convencional y la MD-12 con adición de 0.5% de grano de caucho era prácticamente similar, ahora al realizar las verificaciones respectivas se observa como la mezcla asfáltica MD-12 con el 0.5% de grano de caucho reciclado presenta el menor valor de vacíos con aire respecto a las otras mezclas asfálticas de análisis.

Gráfica 21. Vacíos con aire en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

Esta disminución es de aproximadamente el 6% respecto a la mezcla asfáltica convencional, esto puede presentarse debido a que, aunque los vacíos generalmente aumentan ante la adición de grano de caucho reciclado, estos pueden verse disminuidos al incorporan un mayor contenido de asfalto, situación que se presenta en este caso porque la mezcla asfáltica MD-12 con 0.5% de GCR tiene un contenido de asfalto de 5.5% el cual es mayor al requerido para la mezcla asfáltica MD-12 convencional. Este comportamiento puede significar un parámetro importante al momento de definir la factibilidad de emplear grano de caucho reciclado en el mejoramiento de una mezcla asfáltica densa en caliente.

En cuanto a las otras mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado se observa como el aumento de los vacíos con aire respecto a la mezcla asfáltica convencional es mínimo, para la mezcla asfáltica MD-12 con 2.5% de grano de caucho tan solo aumento en un 1.5% el contenido de vacíos con aire.

Este comportamiento se presenta principalmente se presenta debido a las propiedades elásticas que tiene el grano de caucho reciclado ya que al compactarse puede que no permita el mismo acomodamiento entre partículas por una especie de efecto rebote razón por la cual la densificación de la mezcla puede verse disminuida, pero la similitud entre valores está relacionada directamente con los altos contenidos óptimos de asfalto que requieren las mezclas asfálticas con 1.5%

y 2.5% de grano de caucho, ya que al ser contenidos elevados, el asfalto estando en su temperatura de mezcla ocupa de manera más eficiente los vacíos que puedan existir logrando así un mayor recubrimiento, pero afectando otras propiedades importantes de la mezcla asfáltica como lo son la estabilidad y el flujo.

5.6 VARIACIÓN ÓPTIMOS GRAVEDAD MÁXIMA MEDIDA

El análisis de los valores óptimos se realizó en base a los valores obtenidos una vez realizada la verificación de las diferentes mezclas asfálticas, dentro de los cuales se obtuvieron los valores óptimos de gravedad máxima medida para cada una de las mezclas asfálticas como se presentan en la Tabla 71.

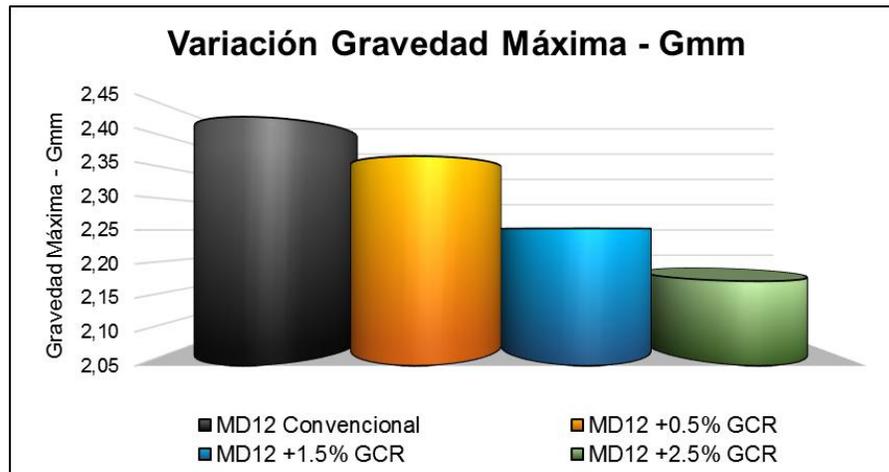
Tabla 71. Valores óptimos gravedad máxima medida.

	<i>MD-12</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>Gmm</i>
Gmm	Convencional	5.2%	2.417
	GCR 0.5%	5.5%	2.359
	GCR 1.5%	6.2%	2.252
	GCR 2.5%	6.4%	2.174

Fuente. Elaboración propia

Con los valores presentados en la Tabla 71 se procedió a realizar la Gráfica 22, para así poder realizar una mejor comparación de la gravedad específica máxima medida por el método Rice en función de cada una de las mezclas asfálticas analizadas.

Gráfica 22. Variación valores óptimos Gravedad máxima medida (Gmm).



Fuente. Elaboración propia

La gravedad máxima medida disminuye a medida que aumenta la adición de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica. Teniendo así que el mayor valor es obtenido para la mezcla asfáltica convencional y a su vez la mezcla asfáltica con menor valor de gravedad máxima medida es la cual contiene de GCR de 2.5%, la cual disminuyo un 10% respecto a la mezcla convencional.

Los valores óptimos obtenidos presentan un comportamiento decreciente, las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado disminuyeron respecto a la mezcla asfáltica convencional, es importante analizar que el valor de la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5% presenta una gravedad máxima medida similar a la mezcla convencional, por lo que se considera que estos valores son adecuados ya que el porcentaje de edición de GCR es mínimo.

De igual manera al incrementar el grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica se puede determinar un cambio importante en la mezcla ya que este valor disminuye considerablemente respecto a la mezcla convencional, ya que para la mezcla asfáltica convencional y la mezcla asfáltica con adición de GCR de 2.5%, se obtuvieron valores de gravedad máxima medida de 2.417 y 2.174 respectivamente.

5.7 VARIACIÓN ÓPTIMOS VACÍOS EN AGREGADOS MINERALES

El comportamiento de esta variable está relacionada principalmente al volumen de agregados en la mezcla asfáltica, al realizar los ensayos al valor óptimo de cada una de las mezclas asfálticas de estudio se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 72.

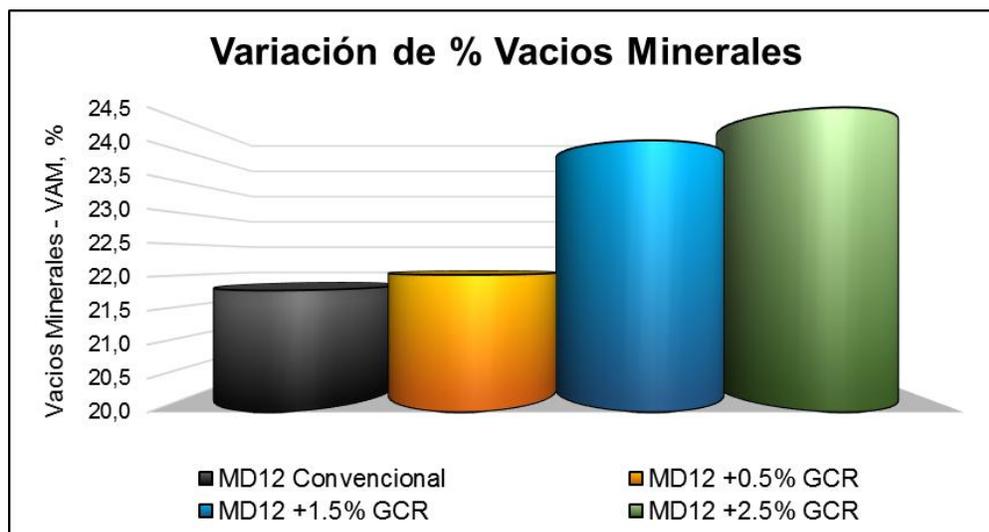
Tabla 72. Variación óptimos %VAM

	MD-12	% Asfalto	% VAM
% VAM	Convencional	5.2%	21.8
	GCR 0.5%	5.5%	22.0
	GCR 1.5%	6.2%	24.0
	GCR 2.5%	6.4%	24.5

Fuente. Elaboración propia

De los resultados obtenidos se puede analizar que la mezcla convencional presenta el menor volumen de vacíos en los agregados minerales con un valor de 21.8%, y a su vez este valor fue creciendo a medida que aumenta el porcentaje de grano de caucho en la mezcla asfáltica. Para un mejor análisis se realizó la Gráfica 23 la cual representa la variación de los vacíos en los agregados minerales para cada una de las mezclas asfálticas de análisis.

Gráfica 23. Variación óptimos %VAM



Fuente. Elaboración propia

La Gráfica 23 permite establecer un comportamiento creciente del porcentaje de vacíos en los agregados minerales, así mismo se obtuvo que la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5%, 1.5% y 2.5%, aumentaron 1.1%, 10.2% y 12.4% respectivamente con relación a la mezcla asfáltica convencional. Esta variación se debe al incremento del asfalto efectivo en cada una de las mezclas con adición de GCR, así como del porcentaje de vacíos con aire de las mismas, lo cual genera un aumento en los vacíos en el agregado mineral.

Según los resultados de vacíos en los agregados minerales para las mezclas asfálticas con contenido de 1.5% y 2.5% de grano de caucho reciclado, se establece que para porcentajes mayores a 2.5% de GCR este valor tenga tendencia a ser constante ya que para estas mezclas asfálticas los valores de porcentaje de vacíos en los agregados minerales son similares.

5.8 VARIACIÓN ÓPTIMOS VACÍOS LLENOS DE ASFALTO, %VFA

En cuanto a los valores óptimos obtenidos en la verificación, para el porcentaje de vacíos llenos de asfalto se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 73, para cada una de las mezclas asfálticas de estudio en la investigación.

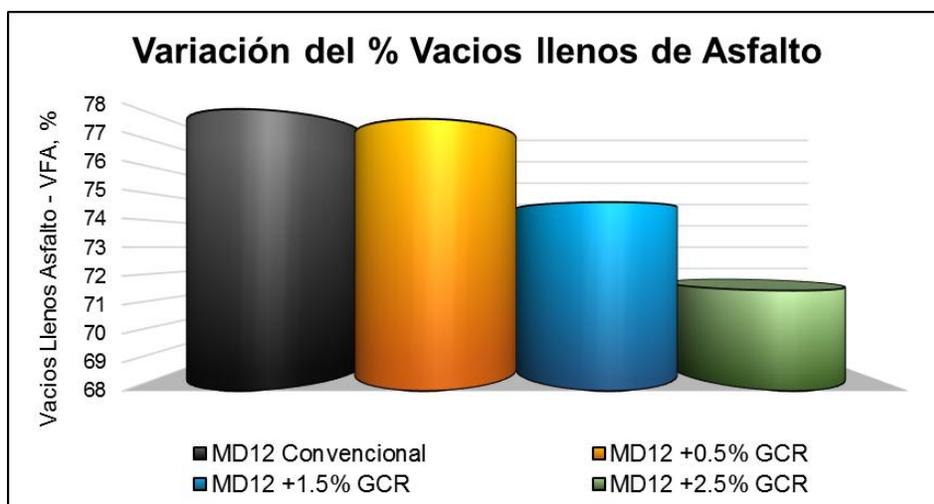
Tabla 73. Valores óptimos porcentajes vacíos llenos de asfalto

% VFA	<i>MD-12</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>% VFA</i>
	Convencional	5.2%	77.8
	GCR 0.5%	5.5%	77.5
	GCR 1.5%	6.2%	74.6
	GCR 2.5%	6.4%	71.5

Fuente. Elaboración propia

Los resultados obtenidos del porcentaje de vacíos llenos de asfalto disminuyen a medida que aumenta el porcentaje de asfalto presente en la mezcla asfáltica, ya que para la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de GCR el porcentaje óptimo de asfalto es el mayor valor de todas las mezclas asfálticas y en la cual se obtuvo el menor valor de vacíos llenos de asfalto con 71.5%. En la Gráfica 24 se muestra el comportamiento de esta variable para cada una de las mezclas de estudio.

Gráfica 24. Variación óptimos %VFA



Fuente. Elaboración propia

La variación del porcentaje de vacíos llenos de asfalto de las mezclas con adición de GCR respecto a la mezcla convencional se puede determinar como mínimo para las mezclas asfálticas hasta 1.5% de GCR, para la mezcla asfáltica con 2.5% de grano de caucho reciclado se estableció que este parámetro disminuyó un 8.1% respecto a la mezcla convencional, lo cual permite analizar que para mezclas asfálticas con porcentajes altos de GCR no se cumple con las especificaciones, por lo que se aconseja adicionar valores bajos de GCR en una mezcla asfáltica de capa de rodadura MD-12.

De acuerdo a los valores obtenidos se puede proponer que la adición de GCR en la mezcla asfáltica mejora las propiedades de esta variable, ya que la mezcla convencional cumple en el límite el criterio establecido por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), pero es importante tener en cuenta que un aumento considerable en el porcentaje de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltico es perjudicial ya que disminuye el porcentaje de vacíos llenos de asfalto en gran medida.

5.9 VARIACIÓN ÓPTIMOS RELACIÓN LLENANTE LIGANTE

Una vez realizados los ensayos a las mezclas asfálticas con el porcentaje óptimo de asfalto, se calcularon los valores del parámetro de relación llenante ligante para cada una de las mezclas asfálticas, los resultados se presentan en la Tabla 74.

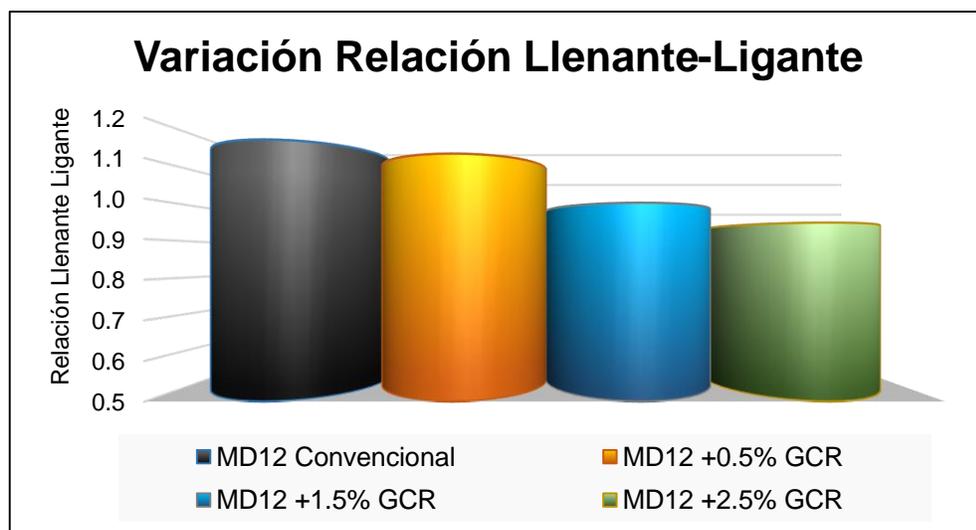
Tabla 74. Valores óptimos Relación llenante ligante

Relación Llenante Ligante	<i>MD-12</i>	<i>% Asfalto</i>	<i>RP</i>
	Convencional	5.2%	1.144
	GCR 0.5%	5.5%	1.104
	GCR 1.5%	6.2%	0.988
	GCR 2.5%	6.4%	0.939

Fuente. Elaboración propia

Para el análisis de esta variable se ha realizado la Gráfica 25 en la cual se presentan los valores obtenidos de la relación llenante ligante para cada una de las mezclas asfálticas elaboradas con el porcentaje óptimo de asfalto del diseño Marshall.

Gráfica 25. Variación valores óptimos Relación llenante ligante.



Fuente. Elaboración propia

Como se describió en el numeral anterior la variable fundamental para la determinación de la relación llenante ligante en la mezcla asfáltica es el porcentaje pasa tamiz N° 200, para la realización de las mismas se utilizó la misma granulometría los valores de relación llenante ligante no presentaron cambios significativos para las mezclas asfálticas de estudio.

De los datos obtenidos se puede analizar que la mezcla convencional representa el mayor valor de la relación llenante ligante y a medida que aumenta el porcentaje de asfalto en la mezcla asfáltica disminuye esta variable, para las mezclas asfálticas con adición de GCR se establece que disminuye este valor respecto a la mezcla convencional, la mezcla asfáltica con adición de GCR de 2.5% presenta la mayor variación, por lo que se puede asumir que la adición de grano de caucho reciclado no afecta la variable de relación llenante ligante en las mezclas asfálticas tipo MD-12 usadas como capa de rodadura.

5.10 VARIACIÓN ÓPTIMOS RELACIÓN ESTABILIDAD-FLUJO

Por último, se realiza el análisis de igual manera que para las demás variables de diseño, luego de la verificación de cada una de las mezclas asfálticas se obtuvieron valores de la relación estabilidad-flujo, los resultados para este parámetro de diseño Marshall se presentan en la Tabla 75.

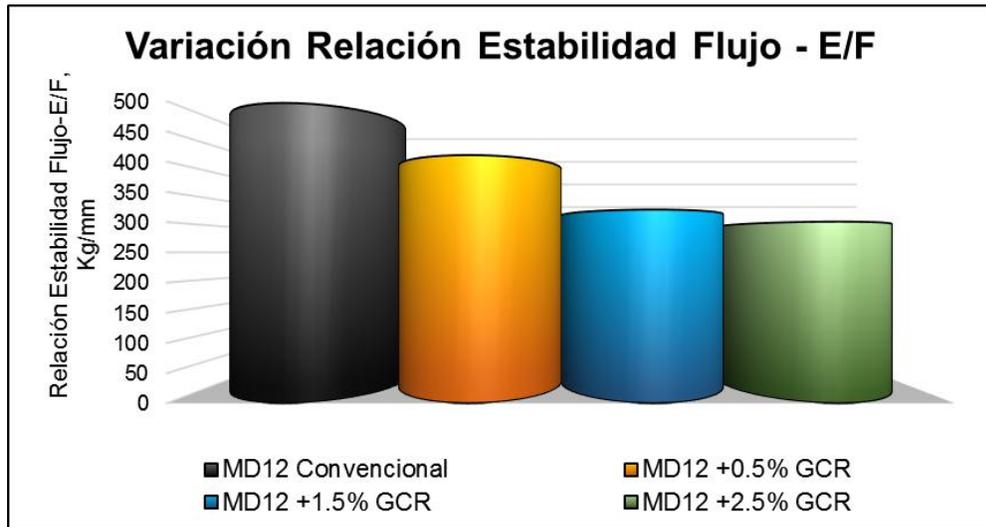
Tabla 75. Valores óptimos Relación Estabilidad-Flujo

	MD-12	% Asfalto	E/F
E/F	Convencional	5.2%	497
	GCR 0.5%	5.5%	411
	GCR 1.5%	6.2%	321
	GCR 2.5%	6.4%	301

Fuente. Elaboración propia

A partir de los resultados obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas trabajadas en el proyecto de investigación, se obtuvieron los valores registrados en la tabla anterior a partir de los cuales se elaboró la Gráfica 26 en la cual se presenta el comportamiento del parámetro de la relación estabilidad/flujo, a continuación, se hace la descripción de tal comportamiento.

Gráfica 26. Variación valores óptimos Relación Estabilidad-Flujo



Fuente. Elaboración propia

Como se pudo establecer en el numeral anterior la adición de GCR en la mezcla asfáltica aumenta el flujo, pero de igual manera disminuye la estabilidad, al analizar estas propiedades mecánicas en conjunto, se obtuvo que la mezcla convencional presenta el mayor valor de esta propiedad, y así mismo la mezcla asfáltica con 2.5% de GCR presenta valor menor de esta relación ya que esta mezcla asfáltica presentó la mayor cantidad de flujo.

Se puede determinar una tendencia a disminuir la relación estabilidad-flujo para las mezclas asfálticas con adición de GCR respecto a la mezcla convencional, este comportamiento puede ser acertado debido a las propiedades elásticas del grano de caucho reciclado a altas temperaturas, de lo anterior se puede afirmar que para mezclas asfálticas con elevados porcentajes de GCR este presenta un efecto negativo ya que aumenta en mayor medida el flujo y por ende disminuye la estabilidad, por lo que se aconseja adoptar valores bajos de GCR en mezclas asfálticas tipo MD-12 como capa de rodadura.

6. DETERMINACIÓN COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO MEDIANTE EL PÉNDULO BRITÁNICO

El ensayo de resistencia al deslizamiento sobre mezclas densas en caliente construidas como capas de rodadura, es un parámetro fundamental que se debe tener en cuenta a la hora de evaluar un pavimento, ya que está directamente relacionado con la seguridad de los usuarios. El cálculo de este parámetro se realizó bajo la norma de ensayo Invias INV.E 792-13, mediante el uso del péndulo Británico. En la Figura 41 se evidencia el equipo empleado para la realización del ensayo.

Figura 41. Medida coeficiente de resistencia empleando el péndulo británico.



Fuente. Elaboración propia

Para la realización del ensayo se elaboraron las briquetas como se indica en el numeral anterior, además se realizaron medidas del coeficiente de resistencia al deslizamiento en condición húmeda y condición seca. Teniendo así que para el par de briquetas de la condición húmeda estas deben estar totalmente húmeda la superficie de ensayo y de igual manera para el par de briquetas en condición seca debe estar totalmente seca la superficie de ensayo.

6.1 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CONVENCIONAL

Siguiendo los parámetros mencionados en la norma de ensayo INV.E 792-13, se realizó la determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento para la muestra asfáltica convencional, en la Figura 42 se muestran las briquetas empleadas para la determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento de la mezcla asfáltica MD-12 Convencional.

Figura 42. Probetas ensayo de péndulo MD-12 convencional



Fuente. Elaboración propia

Realizado el ensayo de acuerdo a lo establecido por la norma Invias se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 76 para la mezcla asfáltica MD-12 Convencional, en estos se observa el CRD tanto en condición húmeda, como para la condición seca.

Tabla 76. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 Convencional.

<i>MD-12</i>	<i>Seco</i>	<i>Humedo</i>	<i>CRD Seco</i>	<i>CRD Humedo</i>	<i>Observacion</i>	
GCR 0%	75	70	0.74	0.68	Cumple	Cumple
	73	65				
	74	68				
	78	70				
GCR 0%	72	67				
	74	66				
	76	70				
	72	70				

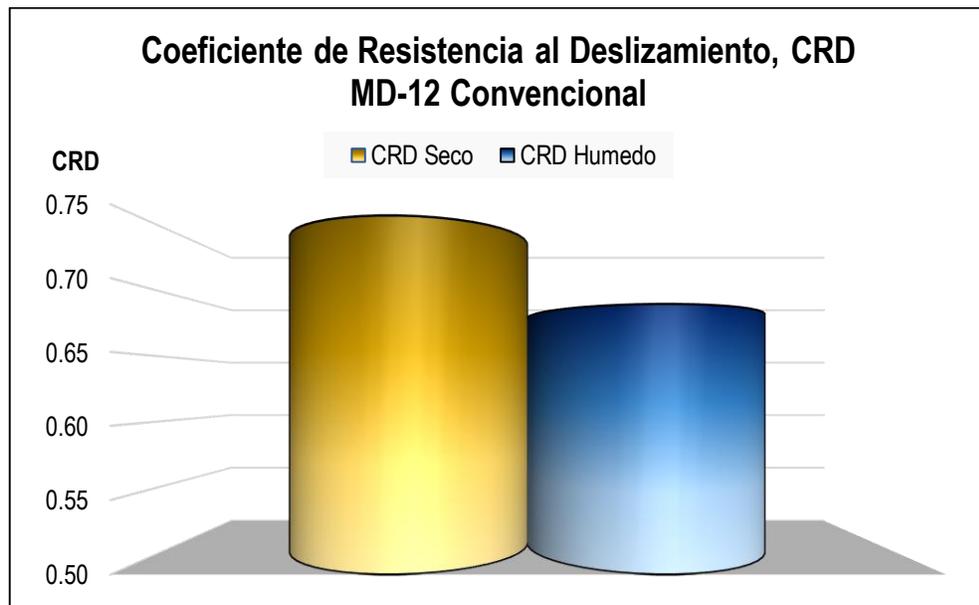
Fuente. Elaboración propia

De los resultados obtenidos en el ensayo de fricción, se evidencia que la mezcla convencional cumple en las condiciones el criterio establecido por la especificación debido a que el INVIAS en su artículo 450-13 estipula que el valor mínimo de coeficiente de resistencia al deslizamiento mínimo para capas de rodadura es un CRD de 0.5.³²

³² Especificaciones Generales de Construcción, Instituto Nacional de Vías INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450-13. Bogotá D.C. 2013. pág. 43.

En la Gráfica 27 se presenta los valores de CRD obtenidos bajo las dos condiciones de ensayo de esta manera se busca evidenciar de manera más clara el comportamiento de este parámetro, para así poder analizar la fricción en los dos estados de funcionalidad del pavimento.

Gráfica 27. Variación del CRD de la MD-12 Convencional.



Fuente. Elaboración propia

El valor de CRD bajo condición en seco en la mezcla asfáltica MD-12 convencional es mayor que en la condición húmeda, estos resultados son apropiados ya que la presencia de agua en los materiales disminuye la fricción. Además, se verificó el cumplimiento del criterio del coeficiente de resistencia al deslizamiento lo que permite precisar que la capa de rodadura una vez puesta en servicio ofrecerá una medida de fricción que brinde al usuario de la vía seguridad y comodidad.

6.2 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 0.5% DE GCR

Para la determinación de la fricción de la mezcla asfáltica se emplearon dos briquetas para las dos condiciones de ensayo, (húmedo y seco). La realización del ensayo se desarrolló según lo estipulado por la norma de ensayo estipulado en el numeral anterior. Las briquetas para la determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 0.5% se evidencian en la Figura 43.

Figura 43. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 0.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

Realizado el ensayo de acuerdo a lo establecido por la norma INVIAS se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 77 para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 0.5%, en esta se encuentran los resultados del péndulo en condición seca y húmeda.

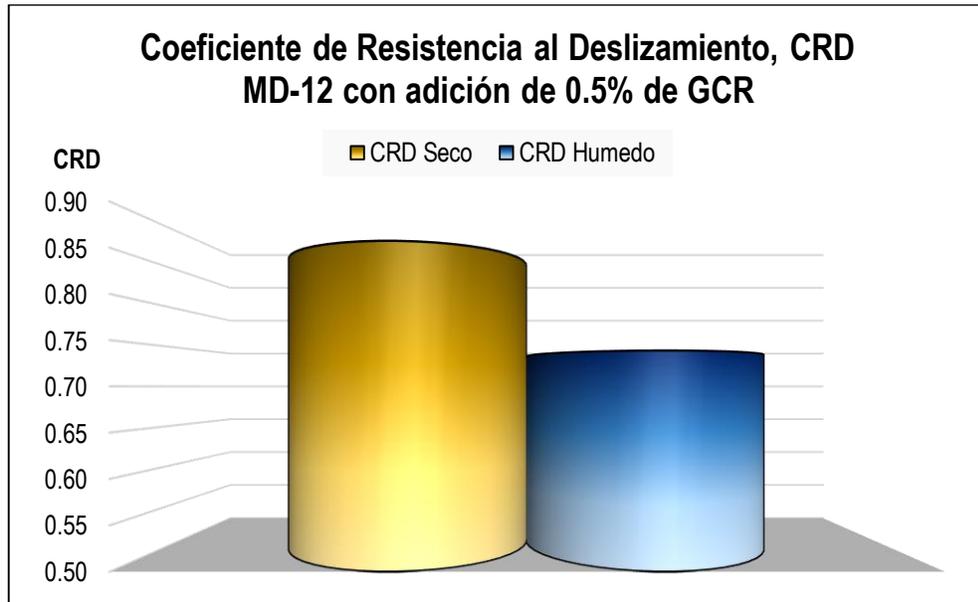
Tabla 77. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 0.5% de GCR

<i>MD-12</i>	<i>Seco</i>	<i>Humedo</i>	<i>CRD Seco</i>	<i>CRD Humedo</i>	<i>Observacion</i>	
GCR 0.5%	88	85	0.86	0.74	Cumple	Cumple
	97	81				
	86	83				
	85	80				
GCR 0.5%	83	65				
	82	60				
	80	67				
	85	70				

Fuente. Elaboración propia

La mezcla asfáltica tipo MD-12 con adición de GCR de 0.5%, cumple en las dos condiciones del ensayo el criterio de fricción establecido por la norma de ensayo Invias, la condición húmeda presenta menor valor de CRD lo cual indica que la presencia del agua disminuye la fricción en el pavimento, este comportamiento se considera típico en las mezclas asfálticas. En la Gráfica 28 se evidencia el comportamiento del coeficiente de fricción bajo las dos condiciones de ensayo.

Gráfica 28. Variación del CRD de la MD-12 con 0.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

El valor crítico de coeficiente de resistencia al deslizamiento es el obtenido bajo condiciones de humedad en la mezcla asfáltica, al realizar la evaluación de fricción se establece que cumple este criterio en las dos condiciones, así mismo se considera que la vía con adición de GCR de 0.5% ofrecerá condiciones óptimas de seguridad en cuanto a la fracción una vez puesta en servicio.

6.3 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 1.5% DE GCR

Para la realización del ensayo se trabajaron dos condiciones de estado superficial del pavimento como lo es bajo condiciones de humedad y condición de humedad, se realizaron dos briquetas para cada condición de ensayo, según lo enunciado en el numeral anterior. En la Figura 44. Se muestran las briquetas empleadas para la determinación del coeficiente de Resistencia al Deslizamiento de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% de GCR.

Figura 44. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 1.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

Realizado el ensayo de acuerdo a lo establecido por la norma INVIAS, tanto en condición húmeda, como en condición seca, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 78 para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 1.5%.

Tabla 78. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 1.5% de GCR

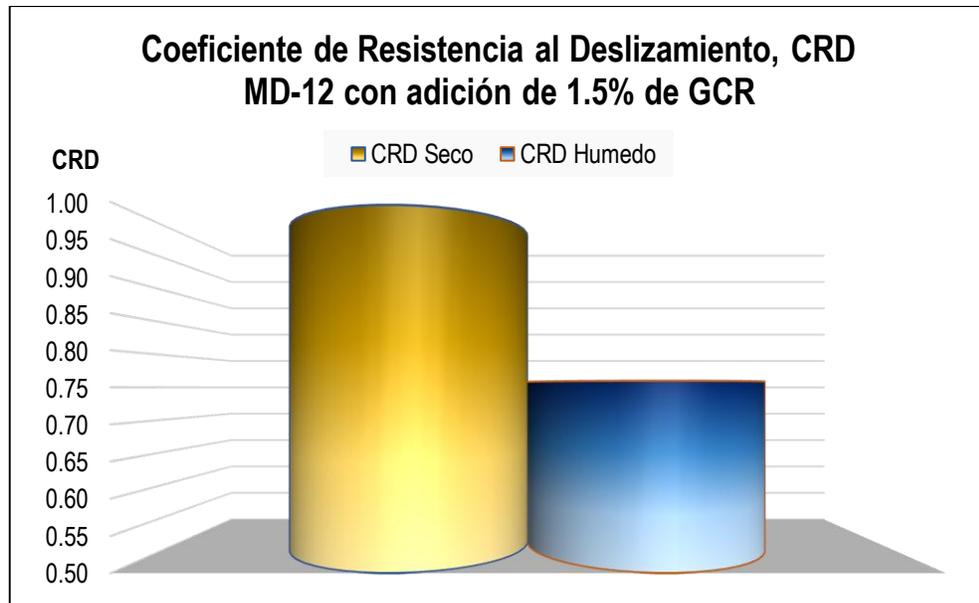
<i>MD-12</i>	<i>Seco</i>	<i>Humedo</i>	<i>CRD Seco</i>	<i>CRD Humedo</i>	<i>Observacion</i>	
GCR 1.5%	99	72	1.00	0.76	Cumple	Cumple
	98	72				
	100	73				
	103	75				
GCR 1.5%	105	82				
	105	80				
	95	78				
	92	75				

Fuente. Elaboración propia

Los valores obtenidos de coeficientes de resistencia al deslizamiento para las condiciones de ensayo cumplen el criterio de aceptación ya que el valor mínimo permitido en el ensayo de la norma de la INVIAS es de 0.5 CRD. Una vez establecido el cumplimiento de la resistencia al deslizamiento se puede establecer que la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5% de GCR presenta condiciones óptimas de seguridad para el usuario de la vía.

En la Gráfica 29 se evidencia el comportamiento del coeficiente de fricción bajo las dos condiciones de ensayo. Los resultados obtenidos de coeficiente de resistencia al deslizamiento bajo las dos condiciones se consideran adecuados ya que el valor de CRD es menor bajo condición húmeda, de igual manera se puede analizar que la briqueta ensayada bajo condición húmeda cumple el criterio establecido por la norma de ensayo.

Gráfica 29. Variación CRD MD-12 con 1.5% GCR (húmedo-seco)

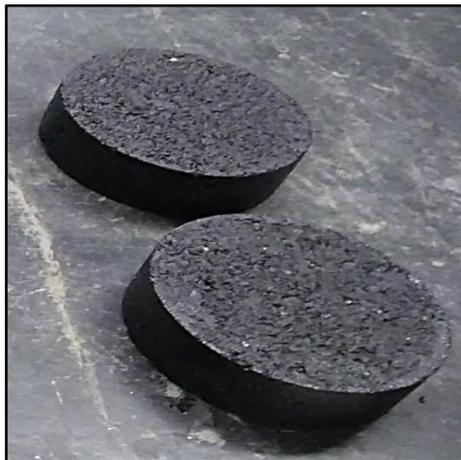


Fuente. Elaboración propia

6.4 MEDIDA DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN MD-12 CON 2.5% DE GCR

De igual manera que para las mezclas asfálticas analizadas anteriormente se realizó el ensayo de fricción empleando el péndulo británico, este se desarrolló bajo la condición húmeda y la condición en seco, teniendo en cuenta que el máximo valor de CRD establecido por la norma Invias de 0.5 CRD. En la Figura 45 se muestran las briquetas empleadas para la determinación del coeficiente de resistencia al deslizamiento de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 2.5% de GCR.

Figura 45. Probetas ensayo de péndulo MD-12 con 2.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

Realizado el ensayo de acuerdo a lo establecido por la norma Invias se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 79 para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 2.5%, en esta se presentan los valores en estado seco y en estado húmedo.

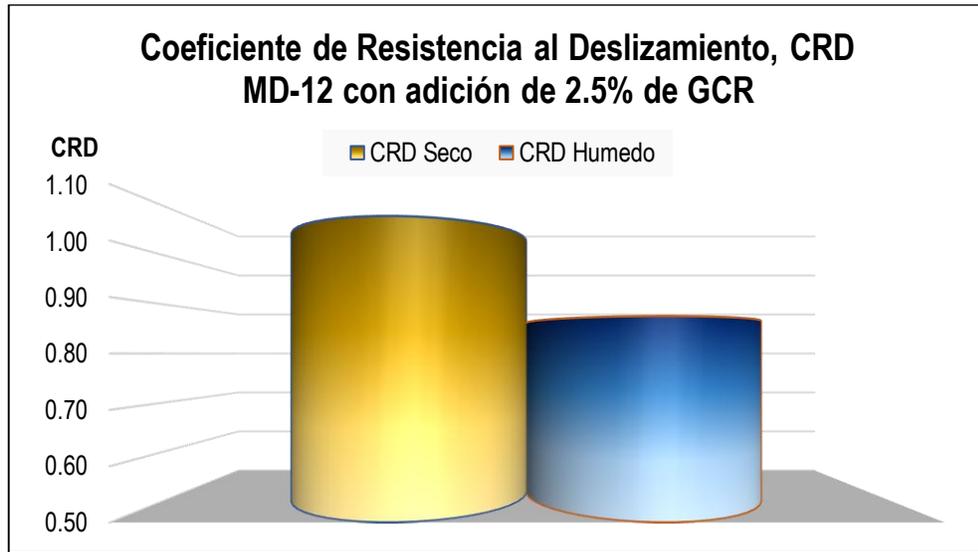
Tabla 79. Resultados resistencia al deslizamiento MD-12 con 2.5% de GCR

<i>MD-12</i>	<i>Seco</i>	<i>Humedo</i>	<i>CRD Seco</i>	<i>CRD Humedo</i>	<i>Observacion</i>	
GCR 2.5%	102	85	1.04	0.87	Cumple	Cumple
	103	86				
	98	85				
	107	83				
GCR 2.5%	105	85				
	102	90				
	108	87				
	110	92				

Fuente. Elaboración propia

Una vez establecido el cumplimiento de la resistencia al deslizamiento se puede establecer que la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 2.5% de GCR presenta condiciones óptimas de seguridad para el usuario de la vía. En la Gráfica 30 se evidencia el comportamiento del coeficiente de fricción bajo las dos condiciones de ensayo.

Gráfica 30. Variación de CRD de la MD-12 con 2.5% de GCR



Fuente. Elaboración propia

Para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de GCR de 2.5% se determinó que el coeficiente de resistencia al deslizamiento es mayor en estado seco, y que este valor disminuye considerablemente en presencia del agua. Además, se estableció que para este tipo de mezcla en condición húmeda se cumple el criterio establecido por la norma de ensayo Invias, ya que el valor obtenido de CRD en húmedo es mayor a 0.5 CRD.

6.5 COMPARACIÓN MEDIDA DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO

Una vez calculado los valores para de coeficientes de resistencia al deslizamiento para todas las mezclas asfálticas de estudio se desea analizar el comportamiento de la medida de fracción en función de la adición de grano de caucho reciclado y además se establece las condiciones de seguridad del pavimento en presencia del agua y en seco. En la tabla 80 se muestran los valores de CRD obtenidos para las diferentes mezclas asfálticas de análisis en la investigación en condición húmedo y en seco.

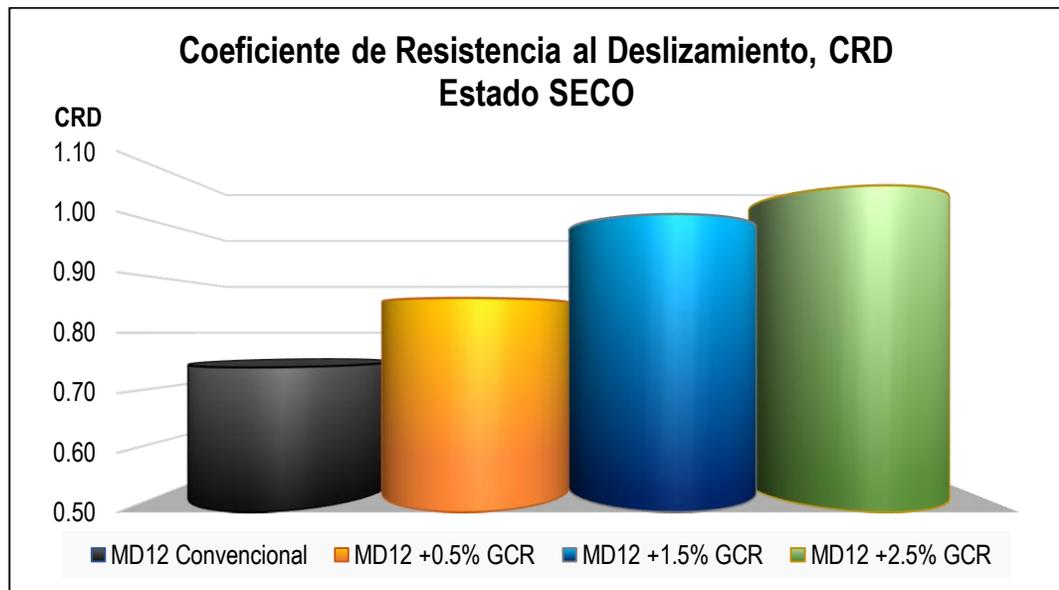
Tabla 80. Resumen valores de CRD obtenidos en laboratorio

	GCR 0%	GCR 0.5%	GCR 1.5%	GCR 2.5%
CRD Seco	0.74	0.86	1.00	1.04
CRD Húmedo	0.68	0.74	0.76	0.87

Fuente. Elaboración propia

Para un mejor análisis de la fricción en función de la adición de grano de caucho reciclado se realizó las gráficas del valor obtenido de CRD para cada tipo de mezcla y la condición del ensayo. En la Gráfica 31 se presenta los valores obtenidos de CRD para todas las mezclas asfálticas de estudio, para un estado de pavimento seco.

Gráfica 31. CRD en función de GCR estado seco



Fuente. Elaboración propia

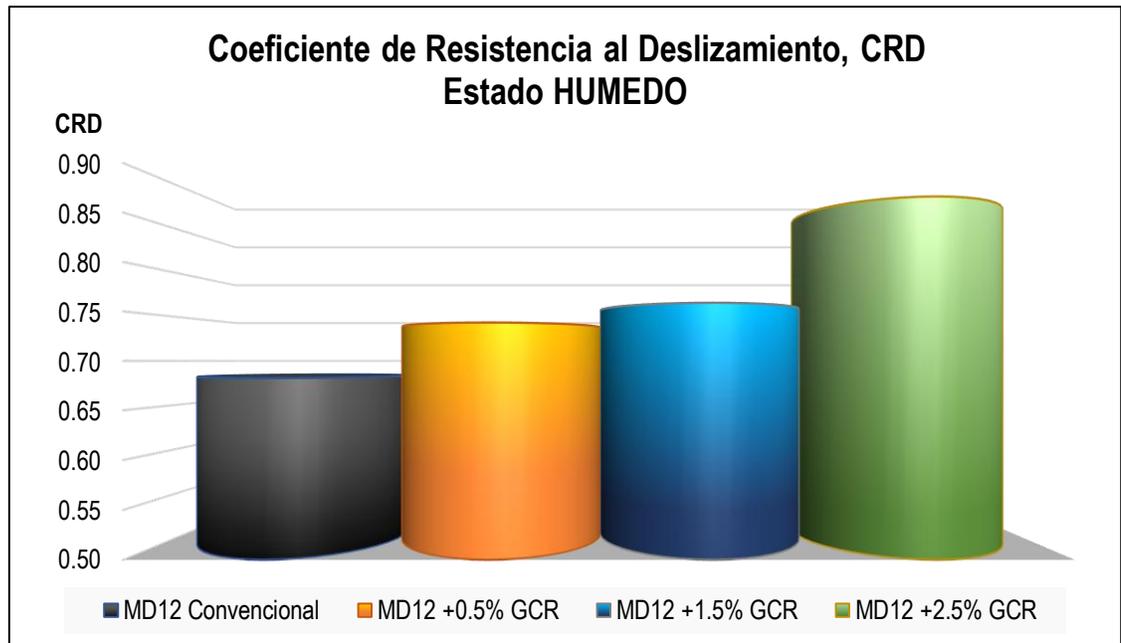
De la gráfica anterior se puede establecer que la adición de GCR en la mezcla asfáltica MD-12 aumenta el coeficiente de resistencia al deslizamiento, ya que el mayor valor obtenido fue para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 2.5%, además se pudo determinar que la mezcla con menor valor de CRD es la mezcla convencional por lo que se puede afirmar que la adición de GCR aumenta la fricción de la mezcla asfáltica MD-12 en estado seco.

El comportamiento de la fricción en función de la adición de GCR en estado seco se considera ascendente ya que a medida que aumenta la cantidad de GCR en la mezcla aumenta el valor obtenido de CRD, teniendo así que el mayor valor obtenido de coeficiente de resistencia a la fricción obtenido en estado seco es de 1.04 CRD para la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de grano de caucho reciclado.

Es importante analizar los valores obtenidos de CRD para las mezclas asfálticas con adición de GCR de 1.5% y 2.5%, evaluando estos dos valores obtenidos 1.00 y 1.04 CRD respectivamente se establece que la mezcla asfáltica alcanza su máxima capacidad de fricción en estado seco, usando valores cercanos de GCR a los mencionados anteriormente, ya que estos dos valores son aproximadamente iguales.

De igual manera se realizó el análisis de la evolución o del comportamiento del coeficiente de resistencia al deslizamiento en estado húmedo para todas las mezclas asfálticas de estudio, como se muestra en la Gráfica 32.

Gráfica 32. CRD en función de GCR estado húmedo



Fuente. Elaboración propia

El valor de CRD en estado húmedo aumenta a medida que aumenta la adición de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica, determinando así que el mayor valor de coeficiente de resistencia al deslizamiento es obtenido en la mezcla asfáltica con adición de 2.5% de GCR, este valor es 0.87 CRD el cual comparado con el obtenido en la mezcla asfáltica convencional de 0.68 CRD si se evidencia una mejora en las propiedades físicas en cuanto a la fricción de la mezcla asfáltica.

La propiedad de la fricción en mezclas asfálticas disminuye en presencia del agua, por lo que se considera que el estado crítico de servicio de la vía se presenta en esta condición, para las mezclas asfálticas de estudio en condición húmedo se tiene que todas cumplieron el criterio de aceptación establecido por la norma de ensayo Invias la cual estipula un valor mínimo de 0.5 CRD. Por lo cual se establece que la vía prestara condiciones óptimas de seguridad para el usuario de la vía en cuanto a la resistencia al deslizamiento.

Los valores obtenidos de CRD en condición húmedo son menores a los obtenidos en condición seca, por ende, se puede afirmar que la presencia del agua disminuye las propiedades de adherencia entre la llanta y asfalto.

7. DETERMINACIÓN MÓDULOS DINÁMICOS MEDIANTE CORRELACIONES

Existen diversas metodologías para la determinación del módulo dinámico mediante correlaciones como se mencionó en la sección 2, las metodologías a emplear en la investigación se seleccionaron de acuerdo al desarrollo, cantidad de variables de análisis y resultados coherentes y similares.

Para la determinación del módulo dinámico se emplearán las metodologías propuestas por el Dr. Witczak, y del Instituto del Asfalto, ya que estas dos metodologías cumplen satisfactoriamente los criterios establecidos anteriormente.

7.1 MÓDULO DINÁMICO EMPLEANDO FÓRMULA DE WITCZAK

El cálculo del módulo dinámico mediante la expresión de Witczak establece los siguientes valores de entrada:

- Viscosidad del asfalto a 70 °F
- Frecuencia correspondiente velocidad de operación
- Composición volumétrica y granulométrica de la mezcla asfáltica

7.1.1 Determinación viscosidad del asfalto a 70°F. El cálculo de esta variable se realizó en base a la norma de ensayo Invias INV.E 801-13, la cual permite calcular la viscosidad del asfalto a 70°F en función de la penetración obtenida en la caracterización del asfalto mediante la aplicación de la Ecuación 17 que se utiliza para valores de penetración mayores a 54 (1/10 mm).³³

$$\mu = \frac{1.559719 * 10^9 * \ln \left[\frac{0.0275}{0.0005 - \frac{0.0114488}{P}} \right]}{P^2} \quad (Ec. 17)$$

Donde:

μ: Viscosidad a 70°F, Poises.

P: Penetración 0.1 mm

³³ Normas de ensayo de materiales, Instituto Nacional de Vías INVIAS. Sección 800. Materiales y mezclas asfálticos y prospección de pavimentos. INV.E-801-13. Bogotá D.C. 2013. pág. 2.

El valor de penetración obtenido en la caracterización del cemento asfáltico es de **97 (1/10 mm)**, una vez reemplazado en la ecuación 17 se obtiene el valor de la viscosidad.

$$\mu = \frac{1.559719 * 10^9 * \ln \left[\frac{0.0275}{0.0005 - \frac{0.0114488}{97}} \right]}{97^2}$$

$$\mu = \underline{\underline{0.709 * 10^6 \text{ Poises}}}$$

7.1.2 Determinación frecuencia aplicación de carga. Para la determinación de la frecuencia de la carga en la mezcla asfáltica es necesario inicialmente calcular el tiempo de aplicación de la carga, usando la ecuación 18.

$$t = 10^{(0.005 * h) - 0.2 - (0.94 * \log V_{op})} \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde:

t: tiempo de aplicación de la carga, seg.

h: espesor capa rodadura, cm.

V_{op}: velocidad de operación, km/h.

La velocidad de operación se estableció como **60 km/h** la cual se puede considerar una velocidad típica en las carreteras del país, de igual manera se estipula una capa de rodadura de **6 cm** como valor máximo que indica la especificación, para la mezcla asfáltica de estudio. Al reemplazar en la ecuación 18 se tiene:

$$t = 10^{(0.005 * 6) - 0.2 - (0.94 * \log 60)}$$

$$\underline{\underline{t = 0.014 \text{ seg}}}$$

Una vez determinado el tiempo de aplicación de la carga se procede a calcular la frecuencia de aplicación de la carga, esto se logra empleando la Ecuación 19 la cual se muestra a continuación:

$$f = \frac{1}{2 * \pi * t} \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde:

f: frecuencia en Hertz.

t: tiempo de aplicación de la carga, en segundos.

Reemplazado en la ecuación 19, se obtiene:

$$f = \frac{1}{2 * \pi * 0.014}$$

$$\mathbf{f = 11.048 \text{ Hz}}$$

7.1.3 Composición volumétrica y granulométrica de la mezcla asfáltica para la determinación del módulo dinámico. Estas variables se obtuvieron del diseño Marshall y el análisis granulométrico para cada una de las mezclas asfálticas de estudio en la investigación, en la Tabla 81 se presenta el resumen de los valores obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas.

Tabla 81. Composición volumétrica y granulométrica mezclas asfálticas.

	MD12 Convencional	MD12 +0.5% GCR	MD12 +1.5% GCR	MD12 +2.5% GCR
Va (%)	4.840	4.551	4.873	4.912
Vbeff (%)	16.96	17.06	17.90	17.51
P200 (% pasa)	5.7	5.7	5.7	5.7
P4 (% retenido)	24.9	24.9	24.9	24.9
P3/8 (% retenido)	7.3	7.3	7.3	7.3
P3/4 (% retenido)	0	0	0	0

Fuente. Elaboración propia

7.1.4 Cálculo módulo dinámico fórmula del Dr. Witczak. Una vez determinadas todas las variables se realiza la determinación del módulo dinámico para cada una de las mezclas asfálticas de análisis en la investigación, empleando la Ecuación 20 la cual fue propuesta por el Dr. Witczak.

$$\begin{aligned} \text{Log } E = & 3.750063 + 0.02932P_{200} - 0.001767(P_{200})^2 - 0.002841P_4 - 0.058097V_a - 0.802208 \left[\frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \right] \\ & + \frac{3.871977 - 0.0021P_4 + 0.003958P_{38} - 0.000017(P_{38})^2 + 0.005470P_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \log(\mu))}} \end{aligned}$$

(Ec. 20)

Donde:

E: módulo dinámico de la mezcla asfáltica (Lb/pulg²)

μ: Viscosidad del ligante (10⁶ Poises)

f: frecuencia de carga (Hertz)

V_a: Porcentaje en volumen de aire (%)

V_{beff}: Porcentaje en volumen efectivo de ligante (%)

P₃₄: Porcentaje retenido en el tamiz 3/4"

P₃₈: Porcentaje retenido en el tamiz 3/8"

P₄: Porcentaje retenido en el tamiz #4

P₂₀₀: Porcentaje pasa en el tamiz #200

Reemplazando en la Ecuación 20 se determinó el valor del módulo dinámico para cada una de las mezclas asfálticas, en la Tabla 82 se evidencia los resultados de módulos dinámicos empleando la correlación propuesta por el Dr. Witczak.

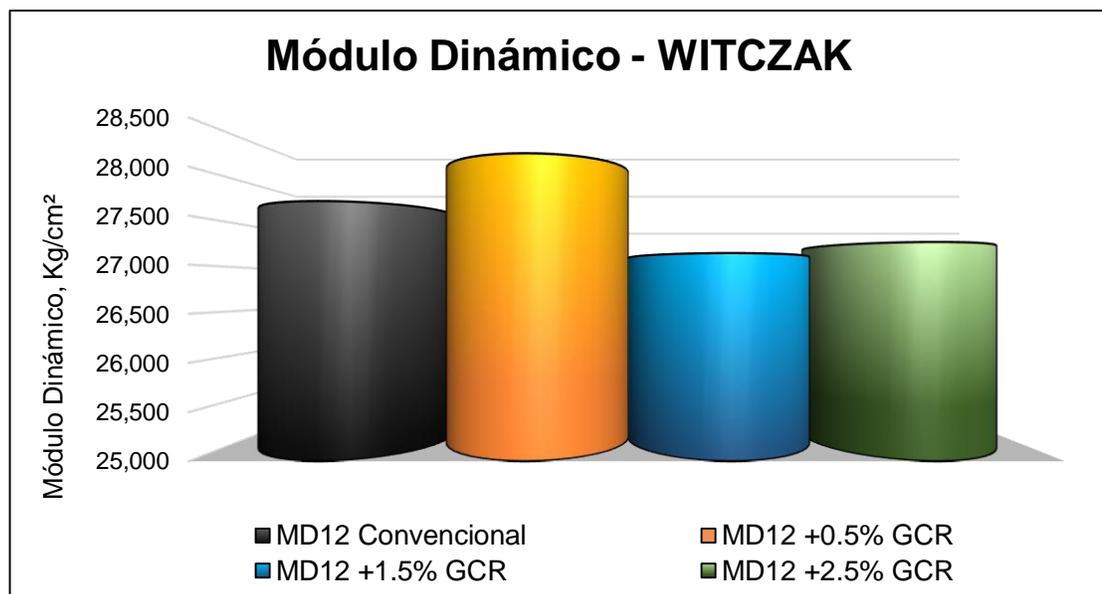
Tabla 82. Módulos Dinámicos obtenidos fórmula Dr. Witczak

WITCZAK				
	MD12 Convencional	MD12 +0.5% GCR	MD12 +1.5% GCR	MD12 +2.5% GCR
E (Lb/pulg2)	394,975	401,936	387,392	389,015
E (Kg/cm2)	27,648	28,136	27,117	27,231
E (N/m2)	2.71E+09	2.76E+09	2.66E+09	2.67E+09
E (MPa)	2,711	2,758	2,659	2,670

Fuente. Elaboración propia

Determinado el módulo dinámico para las diferentes mezclas asfálticas se realizó la Gráfica 33 en la cual se evidencia los valores obtenidos mediante esta correlación, para así poder analizar el comportamiento del módulo dinámico en función de cada una de las mezclas asfálticas de estudio.

Gráfica 33. Módulo dinámico fórmula del Dr. Witczak.



Fuente. Elaboración propia

De la Gráfica 33 se establece que para mezclas asfálticas con adición de GCR de 2.5% el valor del módulo dinámico aumenta aproximadamente 500 Kg/cm² respecto a la mezcla asfáltica convencional, así mismo se determina que para las mezclas asfálticas con adición de 1.5% y 2.5% de grano de caucho el módulo dinámico disminuye 1.9% y 1.5% respectivamente en relación a la mezcla asfáltica convencional.

Según los resultados obtenidos mediante la fórmula del Dr. Witczak el módulo dinámico es similar para las diferentes mezclas asfálticas, teniendo así que el mayor valor de módulo dinámico se obtuvo para la mezcla asfáltica con adición de grano de caucho de 2.5%, de igual manera la mezcla asfáltica con adición de GCR de 1.5% presenta el menor valor de módulo dinámico para las diferentes mezclas asfálticas de análisis.

El módulo dinámico para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 2.5% es mayor 113 kg/cm² respecto a la mezcla asfáltica con adición de GCR de 1.5%, la diferencia del módulo dinámico se considera mínima, por lo que se establece que el comportamiento adecuado del módulo dinámico es presentar tendencia a disminuir a partir del mayor valor de módulo dinámico, a medida que se aumenta el GCR en la mezcla asfáltica, ya que a mayor grano de caucho aumentan los vacíos en la mezcla asfáltica.

7.2 DETERMINACIÓN MÓDULO DINÁMICO FÓRMULA DEL INSTITUTO DEL ASFALTO

El Instituto del Asfalto, establece la fórmula para la determinación del módulo dinámico basados en el desarrollo del programa DAMA, Hwang y Witczak (1979), quienes mediante fórmulas y correlaciones desarrollaron la Ecuación 21 la cual se emplea para realizar el cálculo del módulo dinámico.

$$|E^*| = 100000 * 10^{\beta_1} \quad (Ec. 21)$$

La determinación β_1 se encuentra en función de otras variables de calibración que se muestran a continuación.

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005 \beta_2 - 0.00189 \beta_2 f^{-1.1} \quad (Ec. 21a)$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5} \quad (Ec. 21b)$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829 (P_{200} f^{-0.1703}) - 0.03476 V_v + 0.070377 \lambda + 0.931757 f^{-0.02774} \quad (Ec. 21c)$$

$$\beta_4 = 0.483 V_b \quad (Ec. 21d)$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f \quad (Ec. 21e)$$

Donde:

E^* = módulo dinámico de la mezcla asfáltica en Lb/pulg².

f = frecuencia aplicación de carga correspondiente a la velocidad de operación. Hz

T = temperatura de la mezcla, °F.

P_{200} = porcentaje en peso del agregado que pasa tamiz N° 200.

V_v = porcentaje en volumen de vacíos con aire, %.

V_b = porcentaje en volumen de asfalto, %.

λ = viscosidad del asfalto a 70°F (10⁶ Poises).

En la Tabla 83, se evidencia el resumen de las variables de entrada necesarias para realizar el cálculo del módulo dinámico mediante la fórmula definida por el Instituto del Asfalto.

Tabla 83. Resultados variables Instituto del Asfalto.

INSTITUTO DEL ASFALTO				
	MD12 Convencional	MD12 +0.5% GCR	MD12 +1.5% GCR	MD12 +2.5% GCR
Va (%)	4.840	4.551	4.873	4.912
Vbeff (%)	16.96	17.06	17.90	17.51
f (Hertz)	11.048	11.048	11.048	11.048
P200 (%)	5.7	5.7	5.7	5.7
P77 °F	97	97	97	97
T (°F)	68	68	68	68

Fuente. Elaboración propia

Nota: Para la determinación de la temperatura de la mezcla asfáltica T (°F), se utilizó la carta RT- Diseño de pavimentos mediante la metodología SHELL. (Ver Anexo D).

Una vez calculadas las variables de calibración del modelo para cada una de las mezclas asfálticas de estudio, se reemplazan los valores en la Ecuación 21 y cada una de sus ecuaciones derivadas (Ecuación 21 a-e) de la cual se obtienen los siguientes valores de módulo dinámico presentados en la Tabla 84.

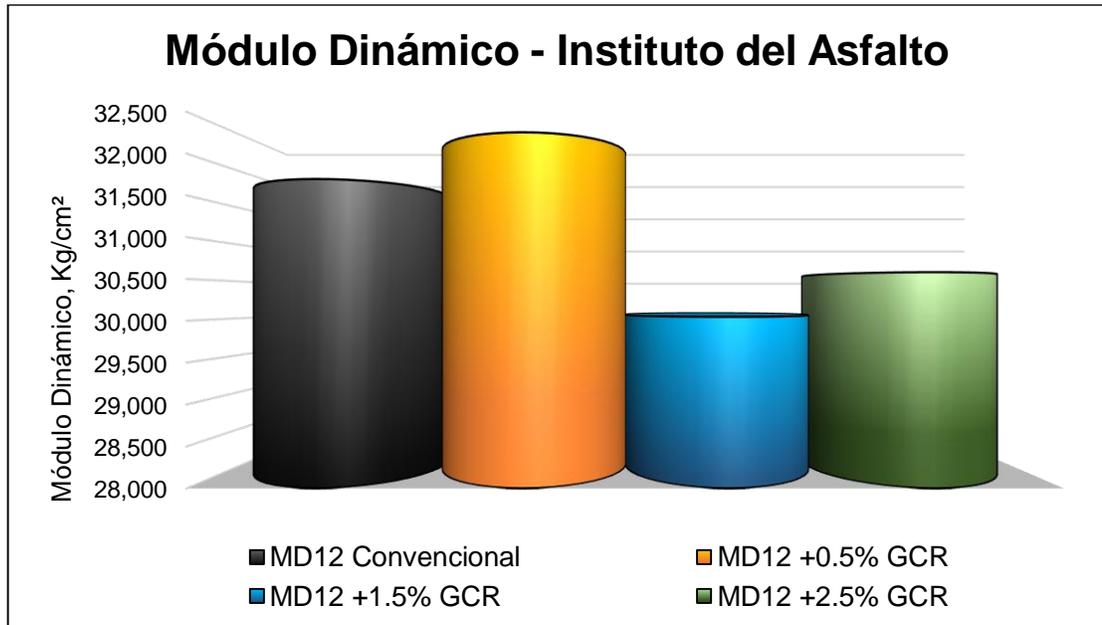
Tabla 84. Módulos dinámicos obtenidos fórmula Instituto del Asfalto.

INSTITUTO DEL ASFALTO				
	MD12 Convencional	MD12 +0.5% GCR	MD12 +1.5% GCR	MD12 +2.5% GCR
E (Lb/pulg2)	452,805	460,790	429,228	436,869
E (Kg/cm2)	31,696	32,255	30,046	30,581
E (N/m2)	3.11E+09	3.16E+09	2.95E+09	3.00E+09
E (MPa)	3,107	3,162	2,946	2,998

Fuente. Elaboración propia

Para observar de manera más clara el comportamiento y realizar un mejor análisis de los valores obtenidos mediante la metodología del Instituto del Asfalto se realizó la Gráfica 34, en la cual se evidencia los resultados de módulo dinámico para cada una de las mezclas asfálticas de estudio.

Gráfica 34. Módulo dinámico fórmula Instituto del Asfalto



Fuente. Elaboración propia

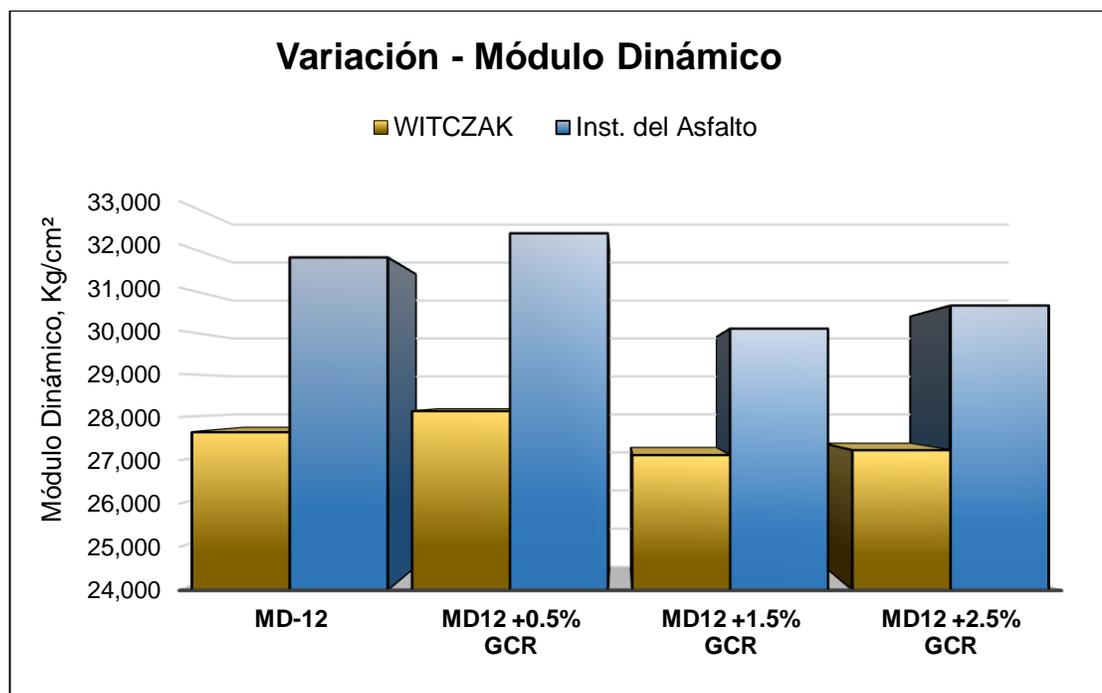
Los valores de módulo dinámico disminuyeron para las mezclas asfálticas con adición de GCR de 1.5% y 2.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional, para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5%, se evidencia un aumento en el módulo dinámico de 600 kg/cm², comparado con la mezcla convencional.

El mayor valor de módulo dinámico obtenido mediante esta correlación se evidenció para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5%, con un valor de 32255 kg/cm², de igual manera la mezcla asfáltica con adición de GCR de 1.5% presentó el menor valor de módulo dinámico de 30046 kg/cm².

7.3 COMPARACIÓN RESULTADOS MÓDULOS DINÁMICOS

Luego de realizar todos los cálculos pertinentes a la determinación del módulo dinámico y con el fin de realizar un análisis de la variación de los resultados obtenidos de módulo dinámico para cada una de las metodologías se realizó la gráfica 35, en la cual se presenta el valor del módulo dinámico para las diferentes mezclas asfálticas de estudio.

Gráfica 35. Variación módulo dinámico-Instituto del Asfalto y Dr. Witczak.



Fuente. Elaboración propia

El valor de módulo dinámico obtenido mediante la metodología del Instituto del Asfalto para todas las mezclas asfálticas de análisis es mayor respecto a los valores calculados en la fórmula del Dr. Witczak, la mayor diferencia de módulo dinámico entre las metodologías analizadas se presentó en la mezcla asfáltica convencional con una variación aproximada de 4000 kg/cm².

El comportamiento en los resultados de módulo dinámico es similar, ya que para las dos metodologías se encontró un valor mayor para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5% y a partir de este valor el módulo dinámico disminuye para las demás mezclas asfálticas con adición de GCR.

8. DEFORMACIÓN PLÁSTICA MEZCLA ASFÁLTICA MD-12

El objetivo principal de este proyecto de investigación es la determinación del efecto que puede llegar a tener la adición del grano de caucho reciclado en una mezcla asfáltica tipo MD-12, como ya se ha mencionado la adición del GCR se realiza mediante vía seca, reemplazando ciertos porcentajes de agregado fino en la granulometría especificada.

Una vez verificadas cada una de las mezclas asfálticas, se procedió a fabricar las probetas observadas en la Figura 46 para realizar el ensayo de resistencia a la deformación plástica, conocido también como deformación o ahuellamiento, de acuerdo con la norma de ensayo INV. E-756-13, como ya se hizo una descripción del procedimiento en un capítulo anterior.

Figura 46. Juego de probetas para ahuellamiento



Fuente. Elaboración propia

En la Figura 46 se observan las probetas elaboradas para realizar los correspondientes ensayos de ahuellamiento o deformación permanente en ensayo de pista de laboratorio, estas probetas se elaboraron a partir de la densidad bulk de cada una de las mezclas asfálticas y el volumen del molde de ensayo.

En cuanto a un requisito de especificación no se encuentra un valor para el tránsito T2-T3 debido a que para verificación solo se exige obligatoriamente para niveles de tránsito superiores o mezclas de alto módulo, simplemente como valor referencia se tomara una velocidad de deformación de máximo $20 \mu\text{m}/\text{mm}^{34}$. A continuación, se presentarán los resultados obtenidos para cada una de las mezclas asfálticas fabricadas para realizar la respectiva comparación y análisis.

³⁴ Especificaciones Generales de Construcción, Instituto Nacional de Vías INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450-13. Bogotá D.C. 2013. pág. 10.

8.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CONVENCIONAL

Inicialmente se somete a ensayo la mezcla asfáltica MD-12 convencional, es decir la que no tiene adición de grano de caucho, se fabrican las dos probetas correspondientes y se realiza la pasada de la rueda durante los 120 minutos, obteniendo los valores de deformaciones permanentes registrados en la Tabla 85.

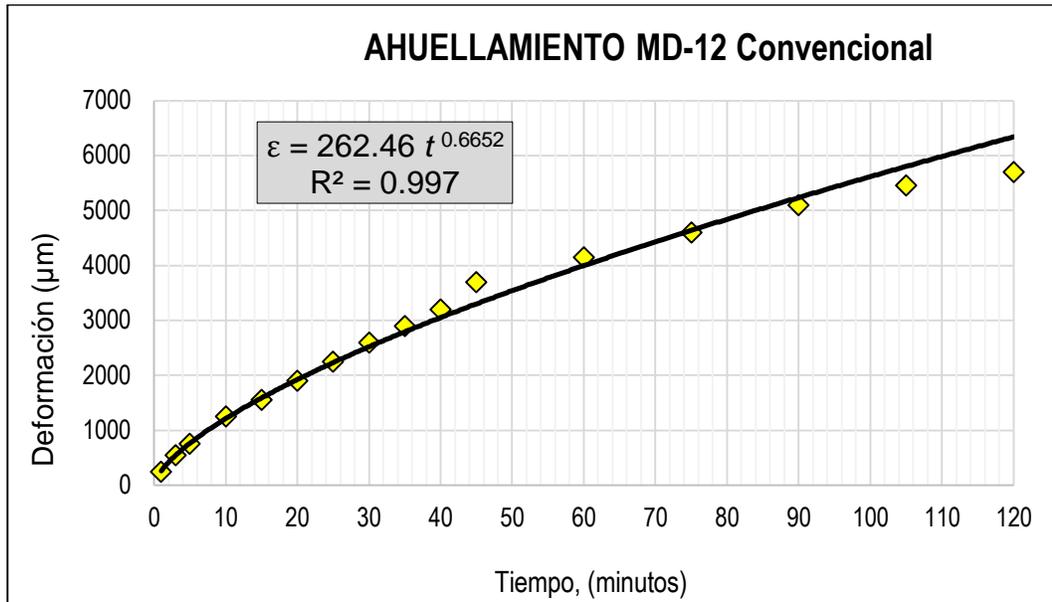
Tabla 85. Deformaciones MD-12 Convencional

Tiempo (min)	Deformación (mm)		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (μm)
0	0	0	0
1	0.2	0.3	250
3	0.5	0.6	550
5	0.7	0.8	750
10	1.2	1.3	1250
15	1.5	1.6	1550
20	1.8	2	1900
25	2.1	2.4	2250
30	2.4	2.8	2600
35	2.7	3.1	2900
40	3	3.4	3200
45	3.6	3.8	3700
60	4	4.3	4150
75	4.5	4.7	4600
90	5	5.2	5100
105	5.4	5.5	5450
120	5.7	5.7	5700

Fuente. Elaboración propia

Con estos valores de deformación permanente promedio expresados en micrómetros (μm) como lo indica la norma de ensayo, se procede a realizar la curva de deformación plástica para la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional. En la Gráfica 36 se observa dicha curva de deformación que según su comportamiento tienen una tendencia exponencial, así como la ecuación que mejor representa dicho comportamiento.

Gráfica 36. Curva de deformación plástica MD-12 Convencional



Fuente. Elaboración propia

En la curva de deformación se observa la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento del ahuellamiento presentado en la mezcla asfáltica MD-12 convencional, la cual está en función del tiempo de aplicación de carga en este caso. De igual manera se debe calcular la velocidad de deformación tal como indica la norma de ensayo del INVIAS, en este caso se determinará la velocidad para el intervalo de 105 a 120 minutos la cual se considera es la más representativa para el comportamiento de la mezcla asfáltica, estos valores se presentan a continuación en la Tabla 86.

Tabla 86. Velocidad de deformación MD-12 Convencional

MD-12 Convencional	
<i>Ahuellamiento (120 min)</i>	5.7 mm
<i>Velocidad (105-120 min)</i>	16.7 µm/min

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 86 se especifica que el ensayo se realizó a 60°C aplicando una carga con una presión de contacto de 7 Kg/cm² durante un periodo de 120 minutos, en los cuales se obtuvo una deformación total de 5.7 mm a una velocidad de 16.7 µm/mm, la cual está por debajo del valor de referencia de 20 µm/mm.³⁵

³⁵ Especificaciones Generales de Construcción, Instituto Nacional de Vías INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450-13. Bogotá D.C. 2013. pág. 10.

8.2 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 0.5% GCR

Ahora se realizará el mismo procedimiento de ensayo, en este caso se realiza la primera de las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado, para esto se fabrican las dos probetas con una adición por vía seca de 0.5% de grano de caucho reciclado, el ensayo se realiza bajo las mismas condiciones de tiempo, carga y temperatura, obteniendo los valores de deformaciones plásticas registrados en la siguiente Tabla 87.

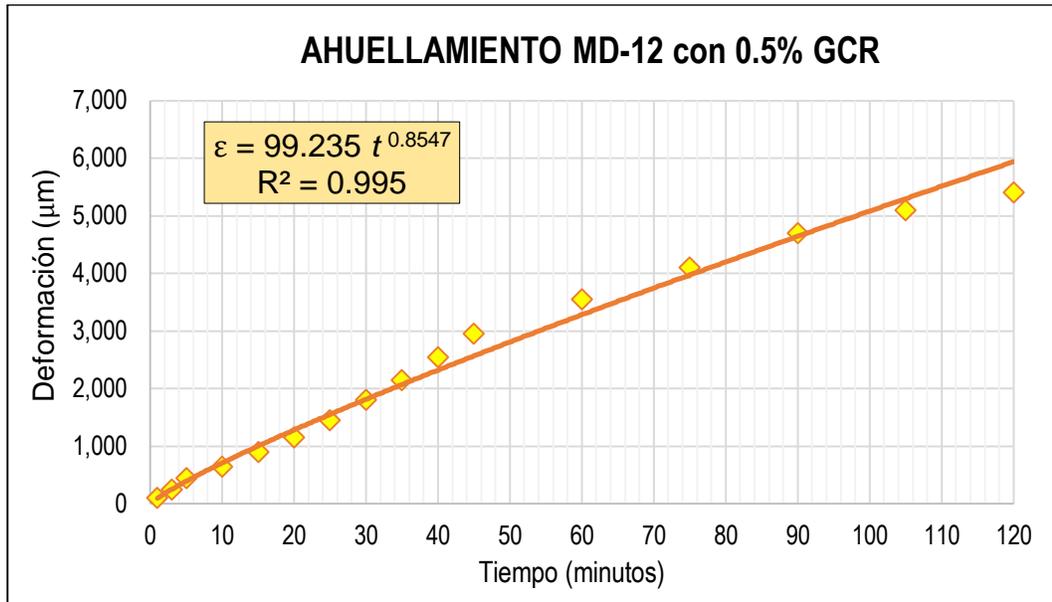
Tabla 87. Deformaciones MD-12 con adición 0.5% GCR

Tiempo (min)	Deformación (mm)		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (μm)
0	0	0	0
1	0.1	0.1	100
3	0.3	0.2	250
5	0.5	0.4	450
10	0.7	0.6	650
15	0.9	0.9	900
20	1.2	1.1	1150
25	1.5	1.4	1450
30	1.8	1.8	1800
35	2.2	2.1	2150
40	2.6	2.5	2550
45	3	2.9	2950
60	3.6	3.5	3550
75	4.2	4	4100
90	4.8	4.6	4700
105	5.2	5	5100
120	5.5	5.3	5400

Fuente. Elaboración propia

Con estos valores de deformación permanente promedio expresados en micrómetros (μm) como lo indica la norma de ensayo, se procede a realizar la curva de deformación plástica para la mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de GCR del 0.5% por vía seca. En la Gráfica 37 se observa dicha curva de deformación que según su comportamiento tienen una tendencia exponencial.

Gráfica 37. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 0.5% GCR



Fuente. Elaboración propia

En la curva de deformación se observa la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento del ahuellamiento presentado en la mezcla asfáltica MD-12 convencional, la cual está en función del tiempo de aplicación de carga en este caso. De igual manera se debe calcular la velocidad de deformación tal como indica la norma de ensayo del INVIAS, en este caso se determinará la velocidad para el intervalo de 105 a 120 minutos la cual se considera es la más representativa para el comportamiento de la mezcla asfáltica, los valores indicados se presentan en la Tabla 88.

Tabla 88. Velocidad de deformación MD-12 con adición 0.5% GCR

MD-12 con 0.5% GCR	
<i>Ahuellamiento (120 min)</i>	5.4 mm
<i>Velocidad (105-120 min)</i>	20.0 µm/min

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 88 se especifica que el ensayo se realizó a 60 °C aplicando una carga con una presión de contacto de 7 Kg/cm² durante un periodo de 120 minutos, en los cuales se obtuvo una deformación total de 5.4 mm a una velocidad de 20.0 µm/mm, la cual tiene un valor que se encuentra al límite del valor de referencia de 20 µm/mm, por lo cual se puede considerar aceptable ya que no es un criterio o requisito que permita determinar el cumplimiento de la mezcla asfáltica.

8.3 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 1.5% GCR

De igual manera se procederá para la mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de 1.5% de grano de caucho reciclado, el ensayo se realiza sobre dos probetas bajo las mismas condiciones de tiempo, presión de contacto y temperatura, obteniendo los valores de deformaciones plásticas registrados en la siguiente Tabla 89.

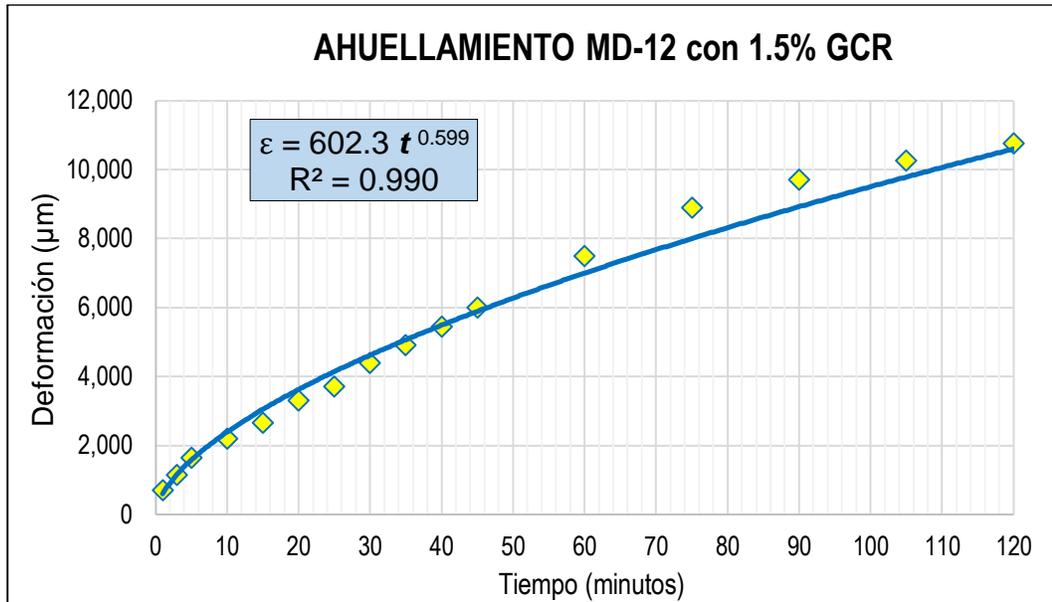
Tabla 89. Deformaciones MD-12 con adición 1.5% GCR

Tiempo (min)	Deformación (mm)		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (μm)
0	0	0	0
1	0.5	0.9	700
3	0.9	1.4	1150
5	1.4	1.9	1650
10	2.1	2.3	2200
15	2.7	2.6	2650
20	3.2	3.4	3300
25	3.7	3.7	3700
30	4.3	4.5	4400
35	4.9	4.9	4900
40	5.5	5.4	5450
45	5.9	6.1	6000
60	7.4	7.6	7500
75	8.8	9	8900
90	9.7	9.7	9700
105	10.2	10.3	10250
120	10.7	10.8	10750

Fuente. Elaboración propia

La deformación plástica se debe expresar en micrómetros (μm) como lo indica la norma de ensayo, con los valores promedio de deformación se procede a realizar la curva de deformación plástica para la mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de GCR del 1.5% por vía seca. En la Gráfica 38 se observa dicha curva de deformación cuyo comportamiento se ajusta a una tendencia exponencial.

Gráfica 38. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 1.5% GCR



Fuente. Elaboración propia

En la curva de deformación se observa la ecuación que mejor se ajusta al comportamiento del ahuellamiento presentado en la mezcla asfáltica MD-12 con adición del 1.5% de grano de caucho reciclado por vía seca, la cual está en función del tiempo de aplicación de carga en este caso. De igual manera se debe calcular la velocidad de deformación tal como indica la norma de ensayo del INVIAS, en este caso se determinará la velocidad para el intervalo de 105 a 120 minutos la cual se considera es la más representativa para el comportamiento de la mezcla asfáltica, este valor se presenta en la Tabla 90.

Tabla 90. Velocidad de deformación MD-12 con adición 1.5% GCR

MD-12 con 1.5% GCR	
<i>Ahuellamiento (120 min)</i>	10.8 mm
<i>Velocidad (105-120 min)</i>	33.3 µm/min

Fuente. Elaboración propia

Finalmente, en la Tabla 90 se especifica que el ensayo se realizó a 60 °C aplicando una carga con una presión de contacto de 7 Kg/cm² durante un periodo de 120 minutos, en los cuales se obtuvo una deformación total de 10.8 mm a una velocidad de deformación 33.3 µm/mm, la cual sobrepasa el valor de referencia de 20 µm/mm.

8.4 DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12 CON 2.5% GCR

Por último y para dar por finalizado el ensayo de ahuellamiento sobre las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado, se fabrican las dos probetas con una adición de 2.5% de grano de caucho reciclado por vía seca, el ensayo se realiza bajo las mismas condiciones de tiempo, carga y temperatura, obteniendo los valores de deformaciones plásticas registrados en la siguiente Tabla 91.

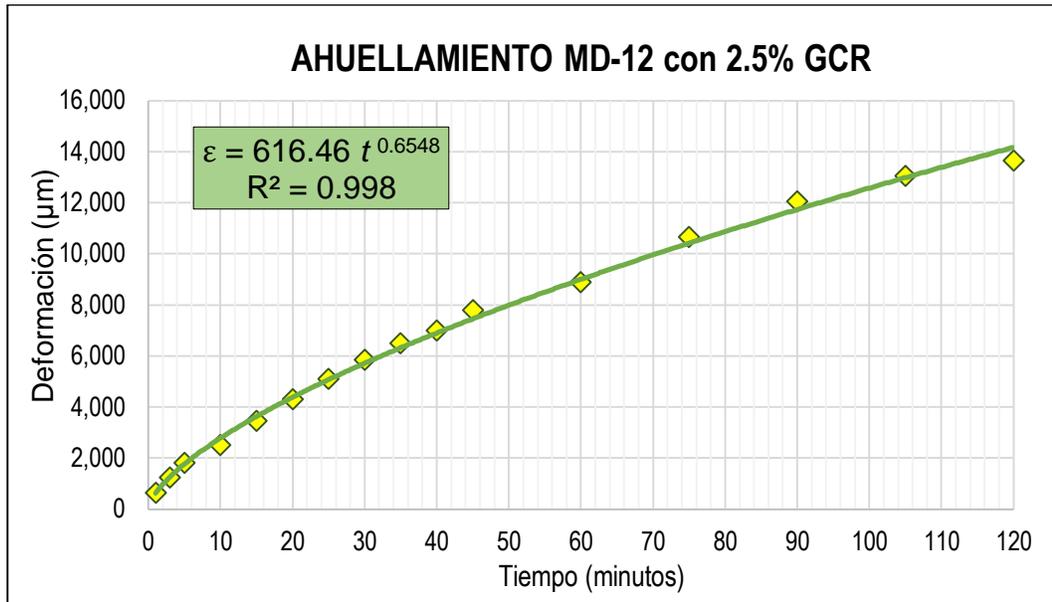
Tabla 91. Deformaciones MD-12 con adición 2.5% GCR

Tiempo (min)	Deformación (mm)		
	Probeta 1	Probeta 2	Promedio (μm)
0	0	0	0
1	0.6	0.7	650
3	1.3	1.2	1250
5	1.7	1.9	1800
10	2.5	2.5	2500
15	3.2	3.7	3450
20	3.9	4.7	4300
25	4.6	5.6	5100
30	5.6	6.1	5850
35	6	7	6500
40	6.5	7.5	7000
45	7.2	8.4	7800
60	8.7	9.1	8900
75	10.5	10.8	10650
90	12	12.1	12050
105	13.1	13	13050
120	13.6	13.7	13650

Fuente. Elaboración propia

Con estos valores de deformación permanente promedio expresados en micrómetros (μm) como lo indica la norma de ensayo, se procede a realizar la curva de deformación plástica para la mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de GCR del 2.5% por vía seca. En la Gráfica 39 se observa dicha curva de deformación que según su comportamiento tienen una tendencia exponencial.

Gráfica 39. Curva de deformación plástica MD-12 con adición 2.5% GCR



Fuente. Elaboración propia

En la curva de deformación se observa la ecuación que está en función del tiempo de aplicación de carga que mejor se ajusta al comportamiento del ahuellamiento presentado en la mezcla asfáltica MD-12 con una adición de 2.5% de grano de caucho reciclado, De igual manera se debe calcular la velocidad de deformación tal como indica la norma de ensayo del INVIAS, en este caso se determinará la velocidad para el intervalo de 105 a 120 minutos la cual se considera es la más representativa para el comportamiento de la mezcla asfáltica y se presenta en la Tabla 92.

Tabla 92. Velocidad de deformación MD-12 con adición 2.5% GCR

MD-12 con 2.5% GCR	
<i>Ahuellamiento (120 min)</i>	13.7 mm
<i>Velocidad (105-120 min)</i>	40.0 µm/min

Fuente. Elaboración propia

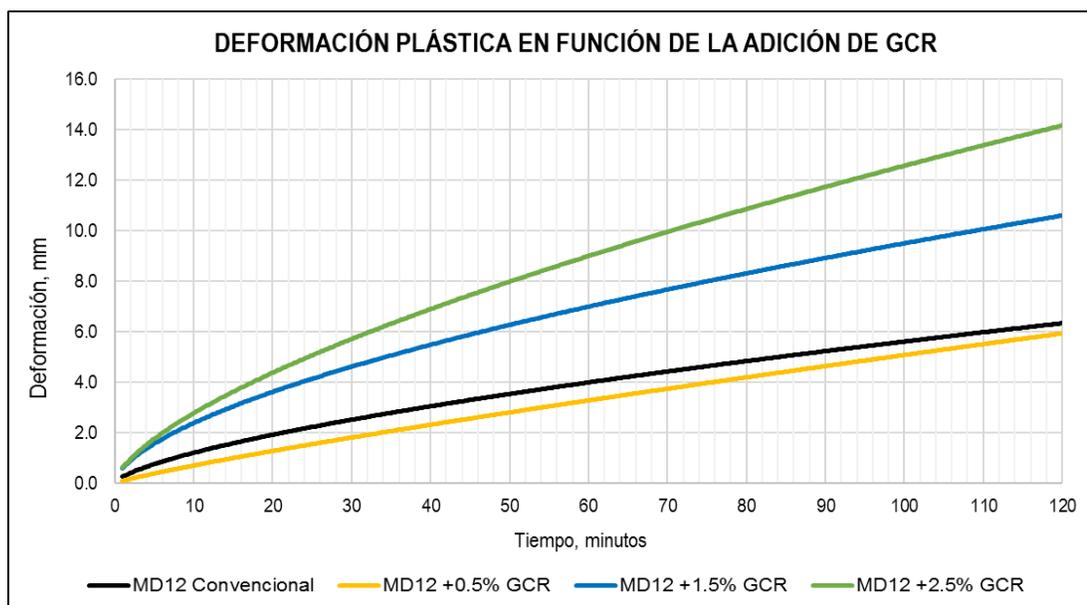
Finalmente, en la Tabla 92 se especifica que el ensayo se realizó durante un periodo de 120 minutos, en los cuales se obtuvo una deformación total de 13.7 mm a una temperatura de 60°C aplicando una carga con presión de contacto de 7 Kg/cm², desarrollando una velocidad de deformación 40.0 µm/mm, la cual está por encima del valor de referencia de 20 µm/mm.

8.5 COMPARACIÓN DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD-12

Una vez realizados los ensayos a cada una de las mezclas asfálticas diseñadas como se observó anteriormente, es necesario realizar una comparación de como la adición del grano de caucho reciclado por vía seca influye en la propiedad de la deformación permanente o ahuellamiento en una mezcla asfáltica tipo MD-12 la cual se diseñó para un nivel de tránsito T2-T3, en esta parte se presentarán tres comparaciones con las cuales se busca definir la influencia del grano de caucho en la mezcla asfáltica de análisis.

El ahuellamiento es una propiedad que da noción de las deformaciones permanentes que ocurren sobre el pavimento, principalmente en la base de la carpeta asfáltica, para conocer el comportamiento de esta propiedad se realizan las curvas de deformación plástica obtenidas del ensayo de pista en laboratorio. Inicialmente se realizará la comparación de las deformaciones obtenidas en cada una de las mezclas asfálticas, para esto se utilizarán las curvas de deformación plástica, como se observan en la Gráfica 40.

Gráfica 40. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

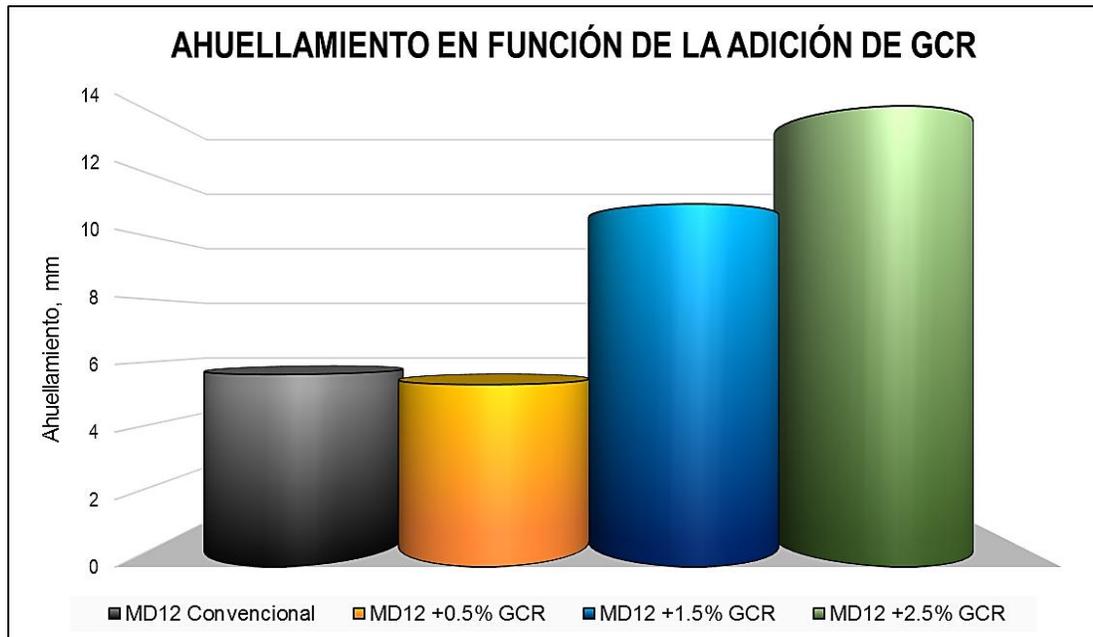
Se observa como el comportamiento de las deformaciones siempre desarrolla un crecimiento con tendencia exponencial, como lo que se busca es realizar una comparación para estimar el efecto que tiene el grano de caucho adicionado por vía seca a la mezcla asfáltica, se toma como referencia la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional la cual se trabaja sin ningún tipo de adiciones. Según esto se tiene que:

La mezcla asfáltica tipo MD-12 a la cual se le adiciona un 0.5% de grano de caucho reciclado presenta una disminución en los valores de deformación registrados, aunque la variación puede llegar a ser mínima comparada con los resultados obtenidos en la mezcla asfáltica MD-12 convencional, este resultado da idea de una mejora en las propiedades mecánicas de la mezcla, debido a que el ahuellamiento es una de las fallas que más se presentan en una estructura de pavimento por lo cual se puede considerar factible la adición de grano de caucho reciclado para este tipo de mezcla y por lo menos en esta proporción de 0.5%.

Contrario ocurre con las mezclas asfálticas restantes, ya que tanto para la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 1.5%, como la adición del 2.5% de grano de caucho reciclado, se observa como las deformaciones aumentan en una magnitud considerable respecto a la mezcla convencional, lo cual indica que ante adiciones de grano de caucho mayores la mezcla asfáltica ya no presentaría unas propiedades de funcionamiento óptimas y adecuadas en cuanto a su funcionamiento.

A continuación, se realizará otro tipo de comparación para seguir buscando una evaluación más detallada de la influencia que tiene la adición mediante vía seca de grano de caucho reciclado sobre las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica tipo MD-12 diseñada. Ahora se realiza una comparación entre los valores finales de ahuellamiento ocurridos al transcurrir los 120 minutos de ensayo en pista, bajo las condiciones de presión de contacto y temperatura ya indicadas anteriormente. Estos valores se presentan en la Gráfica 41.

Gráfica 41. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

En la Gráfica 41 se presentan los valores de ahuellamiento expresados en milímetros obtenidos al finalizar el periodo de 120 minutos que dura el ensayo en cada una de las mezclas asfálticas que fueron objeto de análisis en laboratorio, a partir de los cuales se realizara la siguiente comparación:

En la mezcla asfáltica MD-12 convencional se alcanzó una deformación máxima de 5.7 mm, esta mezcla asfáltica tiene un contenido de asfalto de 5.2%, estos servirán como valores referencia para las comparaciones a las que haya lugar en cuanto a la propiedad de resistencia a la deformación plástica o ahuellamiento.

Como ya se observó la mezcla asfáltica MD-12 con una adición de grano de caucho reciclado del 0.5% presenta mejores propiedades de resistencia a la deformación plástica debido a que los valores de ahuellamiento obtenidos son menores a los registrados para la mezcla asfáltica MD-12 convencional. En este caso la mezcla asfáltica tiene un contenido de asfalto del 5.5% y presentó un valor máximo de deformación de 5.4 mm lo que se traduce en una disminución del 5% del ahuellamiento en comparación con la MD-12 convencional.

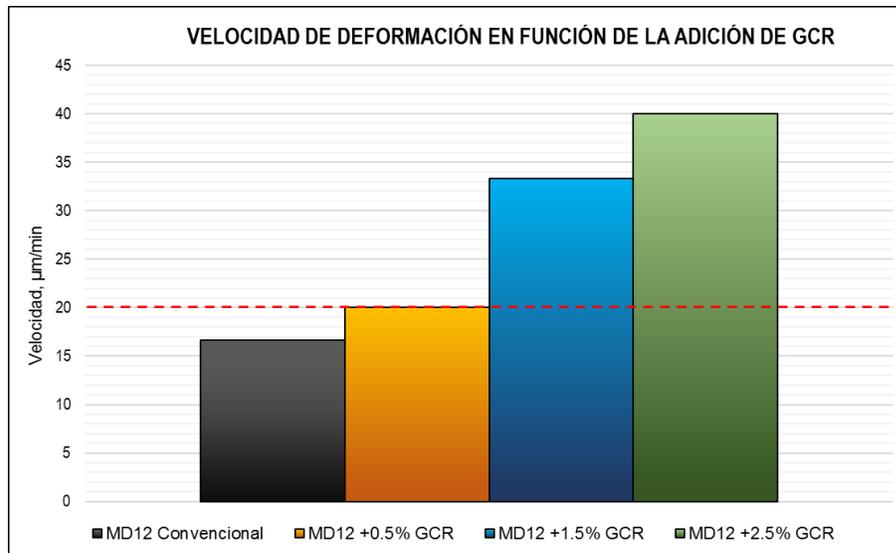
Al adicionar grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica en un 1.5% en esta ya se empiezan a observar alteraciones considerables en sus propiedades, tal como se observa para el caso del ahuellamiento, esta mezcla asfáltica con contenido de asfalto de 6.2% con una adición de caucho del 1.5% presentó un valor de deformación máxima de 10.75 mm, lo cual hace pensar que el comportamiento de la mezcla asfáltica ante las cargas impuestas por el tránsito no puede ser muy favorable, ya que se presenta un aumento del 89% en el ahuellamiento.

Por último, se tiene la mezcla asfáltica MD-12 con adición de grano de caucho reciclado del 2.5%, esta es la que presenta un comportamiento más desfavorable en cuanto a la resistencia a la deformación plástica, para esta mezcla se determinó un contenido óptimo de asfalto de 6.4% y presentó una deformación máxima de 13.65 mm al cabo de los 120 minutos de ensayo, lo cual representa un aumento del 139% en el valor de ahuellamiento comparado con la mezcla asfáltica MD-12 convencional.

Otra variable importante para el análisis de la deformación plástica o ahuellamiento de una mezcla asfáltica es la velocidad de deformación, las normas colombianas sugieren determinar las velocidades de deformación para tres intervalos como son: 30-45 minutos, 75-90 minutos y 105-120 minutos, siendo esta ultima la de mayor uso en el país considerando que es el intervalo de tiempo en el cual se evidencia de manera más clara y precisa el comportamiento de la mezcla asfáltica que se esté ensayando, teniendo en cuenta esto la última comparación que se realizo fue entre velocidades de deformación obtenidas las cuales están expresadas en $\mu\text{m}/\text{min}$.

De esta manera a continuación se presentan las velocidades de deformación obtenidas en cada una de las mezclas asfálticas diseñadas, en la Gráfica 42 se observa como el comportamiento de la velocidad es directamente proporcional a la adición de grano de caucho reciclado, debido que a medida que se aumenta la proporción de grano de caucho reciclado en la mezcla asfáltica, la velocidad de deformación ira en aumento.

Gráfica 42. Curvas de deformación plástica en función de la adición de GCR



Fuente. Elaboración propia

La mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional presentó una velocidad de deformación de 16.7 $\mu\text{m}/\text{min}$ debido a que se está trabajando con un nivel de tránsito medio no se tiene un valor de comparación con las especificaciones el cual sea requisito para evaluar el cumplimiento de la mezcla asfáltica, sin embargo para poder realizar una comparación se tomara el requisito exigido para un nivel de tránsito mayor T4 en adelante el cual es de máximo 20 $\mu\text{m}/\text{min}$, de acuerdo con este la mezcla asfáltica MD-12 convencional presenta un buen comportamiento ante la aplicación repetida de carga.

Se ha observado como la mezcla asfáltica con un 0.5% de grano de caucho reciclado ha presentado un mejor comportamiento en cuanto a valores de deformación plástica, en este caso comparando las velocidades se tiene que la mezcla asfáltica MD-12 con 0.5% de grano de caucho tiene una velocidad de 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ la cual es mayor a la mezcla asfáltica convencional en un 20%.

Para las dos mezclas asfálticas restantes la tendencia se mantiene, es decir, al adicionar grano de caucho reciclado la mezcla asfáltica no presenta el comportamiento esperado y sus propiedades varían considerablemente de manera

desfavorable, ya que sus velocidades son muy superiores a la presentada por la mezcla asfáltica convencional teniendo aumentos de hasta el 140% en la mezcla asfáltica con 2.5% de grano de caucho reciclado.

De manera general se evidenció que la mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de grano de caucho reciclado del 0.5% mediante un proceso seco es la que mejores propiedades presenta en cuanto a la resistencia a la deformación plástica, debido a que su comportamiento y sus valores de ahuellamiento máximo son inferiores a los presentados por la mezcla asfáltica MD-12 convencional, este comportamiento puede ser en buena medida un indicativo de la factibilidad del uso del grano de caucho reciclado como mejorador de una mezcla asfáltica, debido a que el ahuellamiento es una de las fallas de mayor consideración en el análisis de una estructura de pavimento específicamente la capa asfáltica.

En cuanto a las mezclas asfáltica tipo MD-12 diseñadas con adiciones de 1.5% y 2.5% de grano de caucho reciclado se presentan condiciones y comportamientos totalmente diferentes y desfavorables, debido a que sus valores de deformaciones y velocidades de deformación son considerablemente superiores, lo cual representaría una mezcla asfáltica que muy seguramente no soporte los esfuerzos generados por la acción del tránsito y por ende la vida útil de una estructura con una mezcla de este tipo se vea bastante reducida y afectada.

Este comportamiento se debe en gran medida al contenido de asfalto, debido a que para estas dos mezclas asfálticas fue necesario diseñar con contenidos de asfalto superiores al 6.0% lo cual hace que la mezcla asfáltica sea más susceptible y mecánicamente no tenga unas propiedades óptimas, de igual manera al trabajar con un asfalto AC 80-100 el cual es trabajado generalmente en climas de baja temperatura puede que la temperatura de ensayo de 60°C cause alguna afectación adicional a las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado ya que el punto de ablandamiento para este tipo de asfalto se encuentra entre los 45°C y 52°C, por lo cual esta variable puede ser igualmente objeto de estudio.

9. CONCLUSIONES

En el presente proyecto de investigación realizó el análisis del efecto que representa la adición de grano de caucho reciclado GCR en las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, en especial en el ahuellamiento, para estudiar el efecto se trabajó una mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 para un nivel de tránsito T2-T3 diseñada según las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano IDU, empleando el grano de caucho reciclado adicionado mediante vía seca como material mejorador de la mezcla asfáltica, con variaciones del 0.5%, 1.5% y 2.5%.

Los agregados pétreos empleados en el diseño y fabricación de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12, proporcionados por la cantera Triturados Paz del Rio en el departamento de Boyacá, cumplieron de manera satisfactoria con los requisitos exigidos por las especificaciones generales de construcción del IDU en su capítulo 510-11, logrando valores favorables en cuanto a propiedades de: dureza, limpieza, durabilidad y geometría de sus partículas, tanto para la fracción gruesa, como para la fracción fina.

Las proporciones de material pétreo empleadas en el diseño de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 obtenidas luego de realizar la correspondiente dosificación fueron:

<i>Material</i>	<i>Proporción</i>
<i>Grava ¾"</i>	35%
<i>Arena de trituración</i>	50%
<i>Arena de peña</i>	15%

En el diseño y elaboración de la mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 se utilizó un cemento asfáltico AC 80-100 con un grado de penetración de 97 décimas de milímetro, las temperaturas de trabajo para la fabricación de la mezcla asfáltica tipo MD-12, a partir del viscosímetro rotacional Brookfield fueron:

<i>Temperaturas de Trabajo</i>	
<i>Mezcla</i>	145°C
<i>Compactación</i>	134°C

El grano de caucho adicionado mediante vía seca corresponde a los tamaños que pasan tamices N° 10, N° 40 y N° 80, para adicionarlo a la mezcla asfáltica fue necesario llevar a cabo un proceso de digestión, el cual consistió en someter el GCR a una temperatura de 170°C durante un periodo de dos horas.

Para poder determinar el efecto que tiene la adición del grano de caucho reciclado a una mezcla asfáltica densa mediante vía seca, es necesario tener una referencia a partir de la cual comparar los diferentes resultados de las variables que se buscaban evaluar, para esto se realiza el diseño de una mezcla asfáltica MD-12 convencional aplicando el método Marshall, a partir del cual se obtuvo que:

El contenido de asfalto óptimo para la mezcla asfáltica MD-12 convencional fue de 5.2%, con una gravedad específica bulk- G_{mb} de 2.164, presentando una estabilidad de 1381 Kg y un flujo de 2.78 mm, esta mezcla asfáltica fue verificada siguiendo lo especificado por el IDU cumpliendo satisfactoriamente con los requisitos de adherencia con una relación de resistencias a tensión-RRT de 82.7% y un índice de película de asfalto-IPA de 8.25 μm . En cuanto a sus propiedades volumétricas la mezcla asfáltica MD-12 convencional presentó un volumen de vacíos con aire- V_a de 4.8%.

Se diseñaron tres (3) mezclas asfálticas tipo MD-12 con diferentes variaciones en cuanto a su adición de grano de caucho reciclado-GCR, de igual manera se aplicó la metodología Marshall para el diseño de mezclas asfálticas, siguiendo las especificaciones generales de construcción del IDU, obteniendo:

La mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición de 0.5% de grano de caucho reciclado tuvo un contenido óptimo de asfalto de 5.5% y una gravedad específica bulk- G_{mb} de 2.130, el contenido de vacíos con aire- V_a para esta mezcla asfáltica fue de 4.55%, al realizar la verificación del diseño esta mezcla asfáltica presentó un valor de estabilidad de 1204 Kg, el flujo aumentó respecto a la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional con un valor de 2.93 mm. El valor de adherencia fue de 84.6% en cuanto a la relación de resistencias y el índice de película asfáltica obtenido fue de 8.4 μm .

El contenido de asfalto óptimo para la mezcla asfáltica MD-12 con adición del 1.5% de grano de caucho reciclado fue de 6.2%, con una gravedad específica bulk- G_{mb} de 2.030, presentando una estabilidad de 940 Kg y un flujo de 2.93 mm igual que el valor de la mezcla asfáltica MD-12 con adición de 0.5% de GCR, en cuanto a sus propiedades volumétricas la mezcla asfáltica MD-12 convencional presentó un volumen de vacíos con aire- V_a de 4.87%. Al realizar la verificación correspondiente se obtuvieron valores de adherencia con una relación de resistencias a tensión-RRT de 90.1% y un índice de película de asfalto-IPA de 9.08 μm .

Por último, se diseñó una mezcla asfáltica tipo MD-12 con una adición del 2.5% de grano de caucho reciclado, en esta el contenido óptimo de asfalto fue de 6.4%, lo cual define la tendencia de que a mayor adición de GCR el contenido de asfalto requerido ira en aumento. La gravedad específica bulk- G_{mb} fue de 1.965 y su

volumen de vacíos con aire fue de 4.91%. Luego de realizar la verificación respectiva esta mezcla asfáltica presentó una relación de tensiones asociada a la propiedad de adherencia de 93.8%, su estabilidad fue de 891 Kg siendo la menor de todas las mezclas asfálticas diseñadas en el proyecto de investigación, por otra parte, el flujo fue de 2.96 mm y el índice de película asfáltica–IPA fue de 9.20 μm .

En general, al realizar los diseños de las cuatro mezclas asfálticas tipo MD-12 se presentan ciertos comportamientos que permiten determinar la influencia que tiene la adición de grano de caucho mediante vía seca a una mezcla asfáltica MD-12, inicialmente se tiene que el contenido óptimo de asfalto aumenta a medida que se adiciona grano de caucho reciclado en una mayor proporción. En cuanto al volumen de vacíos con aire se obtuvo que la mezcla asfáltica MD-12 con un 0.5% de GCR tiene un $\%V_a$ que es 6% menor que el presentado por la mezcla asfáltica MD-12 convencional, siendo de esta manera el menor valor obtenido de las cuatro mezclas asfálticas MD-12 diseñadas.

El valor de flujo aumenta a medida que se adiciona una mayor proporción de grano de caucho reciclado presentando aumentos de hasta el 7% en la mezcla asfáltica MD-12 con 2.5% de GCR comparado con el valor de la MD-12 convencional. La gravedad específica bulk– G_{mb} presenta una tendencia decreciente debido a que a mayor cantidad adicionada de grano de caucho reciclado esta propiedad gravimétrica disminuye, lo cual está influenciado por el peso específico del GCR, ya que al ser aproximadamente 5 veces menor que el peso específico del agregado fino, hace que ocupe un mayor volumen al reemplazar la misma masa de material fino.

De igual manera ocurre con la estabilidad cuyo valor disminuye con un aumento en la variación del grano de caucho reciclado, lo cual está relacionado con la cantidad de asfalto requerida para su comportamiento óptimo, la cual es mayor a medida que se incrementa el porcentaje de GCR, así como con las propiedades elásticas del material ya que al compactarse puede que no permita el mismo acomodamiento entre partículas por lo cual la densificación de la mezcla puede verse disminuida y generar resistencias menores.

En cuanto a las demás variables de diseño Marshall se presentaron los siguientes comportamientos: el porcentaje de vacíos en el agregado mineral– $\%VAM$ aumenta con la adición de grano de caucho reciclado y su valor es mayor cada que la proporción de GCR se aumente; la relación estabilidad/flujo– E/F presenta una disminución en sus valores a medida que la proporción de grano de caucho adicionada a la mezcla asfáltica aumenta; otra variable que disminuye es el porcentaje de vacíos llenos de asfalto– $\%VFA$ ya que sus valores son menores ante un incremento en la proporción de GCR que se adicione a la mezcla asfáltica.

Por último, se tiene que la gravedad específica máxima– G_{mm} medida por el método Rice, al igual que la gravedad específica bulk– G_{mb} disminuye en relación al aumento de grano de caucho reciclado adicionado a la mezcla asfáltica; la relación llenante ligante, aunque presenta mínimas variaciones debido a que está en función de un valor constante para todas las mezclas asfálticas que es el porcentaje %Pasa₂₀₀, tiende a disminuir al aumentar la adición de grano de caucho reciclado, a manera de resumen se presenta el comportamiento de las variables de diseño Marshall en función de la adición de grano de caucho reciclado mediante vía seca.

<u>No.</u>	<u>Variable</u>	<u>Comportamiento</u>	<u>Máx. Variación</u>
1	E/F	Disminuye	39.5%
2	Estabilidad	Disminuye	35.5%
3	% Asfalto	Aumenta	23.1%
4	RP	Disminuye	17.9%
5	%VAM	Aumenta	12.4%
6	G_{mm}	Disminuye	10.0%
7	G_{mb}	Disminuye	9.2%
8	%VFA	Disminuye	8.1%
9	Flujo	Aumenta	6.7%
10	%V_a	Aumenta	6.0%

Las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho aumentan la fricción a medida que aumenta el porcentaje de grano de caucho en la mezcla asfáltica, este comportamiento se evidencio según los datos obtenidos del ensayo de coeficiente de resistencia al deslizamiento haciendo uso del péndulo británico para las dos condiciones de estado superficial del pavimento (húmedo y seco). Además, se determinó que para todas las mezclas asfálticas de estudio cumplen el criterio de coeficiente de resistencia al deslizamiento mínimo establecido en el artículo 450-13 de las especificaciones generales de construcción vial INVIAS.

La presencia de agua en la superficie del pavimento genera condiciones de fricción indeseadas para el usuario de la vía, por lo que se considera como critico el ensayo realizado en estado húmedo del pavimento. Se determinó que para este estado superficial la adición de GCR aumento 8.2%, 11.2% y 26.9% el coeficiente de resistencia al deslizamiento respectivamente para las mezclas asfálticas con adición de GCR de 0.5%, 1.5% y 2.5% respecto a la mezcla asfáltica convencional, por lo que se podría recomendar la adición de GCR para el mejoramiento de la fricción en mezclas asfálticas MD-12 empleadas como capa de rodadura.

El módulo dinámico calculado mediante las correlaciones del Dr. Witczak y del Instituto del Asfalto presentan valor mayor para la mezcla asfáltica con adición de GCR de 0.5%, y a partir de este valor el módulo dinámico disminuye, los resultados obtenidos de módulo dinámico no pueden ser considerados correctos para definir

el comportamiento de esta variable de resistencia mecánica, por lo que se establece necesario la realizaron del ensayo de módulo dinámico para cada una de las mezclas asfálticas de análisis.

La variación del módulo dinámico entre las correlaciones empleadas es mínima ya que los resultados obtenidos son similares, así mismo se evidencia la misma tendencia a disminuir el módulo dinámico para mezclas asfálticas con adición de grano de caucho 1.5% y 2.5%.

Para realizar el análisis principal del presente trabajo de investigación se ejecutó el ensayo de resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas empleando la pista de ensayo de laboratorio o equipo Wheel Tracker, bajo condiciones específicas de temperatura 60°C y una presión de contacto de la rueda de 7 Kg/cm² durante un periodo continuo de 120 minutos, de acuerdo con lo indicado en la norma de ensayo INV. E-756-13 del Instituto Nacional de Vías, el cual se aplicó a cada una de las mezclas asfálticas tipo MD-12 diseñadas y a partir del cual se destaca lo siguiente:

La mezcla asfáltica densa en caliente tipo MD-12 convencional desarrollo una deformación plástica con tendencia exponencial y luego de los 120 minutos de ensayo alcanzó una deformación plástica o ahuellamiento total de 5.7 mm, desarrollando una velocidad de deformación de 16.7 µm/min, debido a que el nivel de tránsito que se definió para el trabajo de investigación es un T2-T3, la velocidad de deformación no se exige como requisito en la aceptación de la mezcla asfáltica, sin embargo para tener una referencia se compara con el valor exigido para tránsitos mayores a T4 que es de máximo 20 µm/min, por lo cual para la mezcla asfáltica MD-12 convencional se desarrolló una velocidad de deformación aceptable, siendo menor al valor de referencia.

Los resultados del ensayo de ahuellamiento realizados sobre la mezcla asfáltica MD-12 con una adición de 0.5% de grano de caucho reciclado presentaron una tendencia favorable que se puede destacar en cuanto a la influencia que puede tener la adición de grano de caucho reciclado como material mejorador de las propiedades mecánicas de una mezcla asfáltica, esto debido a que el valor de deformación plástica o ahuellamiento total finalizado el periodo de 120 minutos fue de 5.4 mm, es decir presentó una disminución en su ahuellamiento del 5.3% respecto a la mezcla asfáltica MD-12 convencional, por otra parte la velocidad de deformación que se desarrollo fue de 20 µm/min la cual es aceptable teniendo en cuenta que no es un requisito obligatorio.

En cuanto a las dos mezclas asfálticas restantes con adición de grano de caucho los resultados no se presentan favorables, debido a que en ambas se presentaron altos valores de ahuellamiento y de velocidad de deformación; la mezcla asfáltica

MD-12 con adición de 1.5% de grano de caucho reciclado presentó una deformación total de 10.8 mm, aproximadamente un 90% más que la obtenida en la mezcla asfáltica MD-12 convencional, de igual manera la velocidad de deformación presenta un alto valor de 33.3 $\mu\text{m}/\text{min}$.

La mezcla asfáltica MD-12 con adición de grano de caucho reciclado del 2.5% es la que presenta los resultados más desfavorables ya que su deformación total al termino de los 120 minutos de ensayo fue de 13.7 mm lo que representa un incremento del 140% respecto a la deformación obtenida en la mezcla asfáltica tipo MD-12 convencional y la velocidad de deformación que desarrollo fue de 40 $\mu\text{m}/\text{min}$, la cual se considera significativamente elevada.

<u>Mezcla Asfáltica</u>	<u>Comportamiento</u>	<u>Variación</u>
<u>MD-12 Convencional</u>	Referencia	-
<u>MD-12 + 0.5% GCR</u>	Disminuye	- 5.3%
<u>MD-12 + 1.5% GCR</u>	Aumenta	+ 89.5%
<u>MD-12 + 2.5% GCR</u>	Aumenta	+ 140.4%

En general se obtuvo una tendencia marcada en la velocidad de deformación, debido a que a medida que se aumenta la proporción en la que se adiciona el grano de caucho reciclado a la mezcla asfáltica, la velocidad de deformación se incrementa de manera significativa, por otra parte se obtuvo que las mezclas asfálticas con adiciones de grano de caucho reciclado de 1.5% y 2.5% presentan los valores más altos de ahuellamiento, estos comportamiento igualmente pueden estar asociados a los altos contenidos de asfalto que se requieren para que estas mezclas asfálticas presenten propiedades que cumplan con los requisitos de las especificaciones de construcción del IDU en cuanto a su diseño.

Es importante analizar las condiciones del ensayo de resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio, ya que al someter la briqueta elaborada con cemento asfáltico AC 80-100 a temperatura de 60°C durante el tiempo de duración de la prueba reduce las condiciones de resistencia mecánica, puesto que este tipo de cemento asfáltico es fabricado para condiciones de temperatura bajas.

Una vez evaluados los resultados de las variables Marshall como la estabilidad, porcentaje de vacíos con aire, flujo, así como los valores obtenidos en los ensayos de verificación de adherencia y el índice de película de asfalto, además de los resultados de resistencia al deslizamiento y principalmente analizando el efecto del grano de caucho reciclado en el ahuellamiento o deformación plástica para cada una de las mezclas asfálticas de estudio se considera que el porcentaje óptimo con el cual se obtuvieron los mejores resultados es para la mezcla asfáltica con adición

de 0.5% de GCR, por lo que se sugiere tomar este valor como porcentaje óptimo de adición mediante vía seca para mezclas asfálticas tipo MD-12 usadas como capa de rodadura para un nivel de tránsito T2-T3, según las especificaciones generales de construcción del Instituto de Desarrollo urbano de Bogotá IDU 2011.

10. RECOMENDACIONES

Se considera necesario la realización de nuevas investigaciones para otros tipos de mezclas asfálticas como las mezclas asfálticas semidensas y gruesas. Así mismo analizar el comportamiento de las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica para las demás capas asfálticas (base e intermedia), que conforman la carpeta asfáltica.

Analizar el efecto en los parámetros de resistencia para mezclas asfálticas con un único tamaño de grano de caucho reciclado, preferiblemente evaluar el comportamiento para tamaños de GCR como los tamices (N° 40 o N° 10), de igual manera el realizar ensayos de laboratorio de mayor sofisticación contribuirán a una evaluación más profunda del efecto que genera el grano de caucho en una mezcla asfáltica, estos ensayos podrían ser referentes a la caracterización química al grano de caucho reciclado.

Seguir estudiando este tipo de mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado variando los porcentajes de adición de GCR entre 0.5% y 1.0%, ya que, según los resultados obtenidos, dentro de este rango se mejoran las propiedades mecánicas y de resistencia de la mezcla asfáltica.

Para futuras investigaciones variar el tipo de cemento de ligante asfáltico utilizado en el diseño de la mezcla asfáltica, y así poder analizar el comportamiento mecánico o de resistencia de las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho para los cementos asfálticos AC 40-50 y AC 60-70, empleados frecuentemente en el país.

Se debe realizar los ensayos de laboratorio para la obtención del módulo dinámico y así poder establecer un comportamiento adecuado en el efecto de la adición del grano de caucho en esta variable. El cálculo del módulo dinámico mediante correlaciones no puede ser utilizado como criterio de evaluación sino como un valor inicial o aproximado.

Es necesario realizar los ensayos de laboratorio para la determinación de las leyes de fatiga y módulo resiliente como criterios de verificación de la mezcla asfáltica para posteriormente evaluar el cumplimiento o aceptación de las mezclas asfálticas de análisis.

Analizar el efecto del grano de caucho reciclado en el ruido, puesto que es necesario tomar medidas que permitan reducir esta externalidad del transporte que ha venido aumentando y a la cual no se tiene mayor control o regulación en el país.

Para las mezclas asfálticas con adición de grano de caucho reciclado mediante vía seca se debe garantizar que se cumpla a cabalidad el tiempo y temperatura de digestión, el cual es importante para lograr la adecuada interacción del grano de caucho actuando como agregado, razón por la cual es recomendable estudiar y analizar el efecto directo que tienen el tiempo y temperatura de digestión del GCR sobre las propiedades de la mezcla asfáltica, por lo cual se sugiere el estudio para variaciones en el tiempo y temperatura de digestión.

BIBLIOGRAFÍA E INFOGRAFÍA

ANGUAS, P. y ALAMILLA, H. Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas. Sanfandila. 2005.

BAYONA, Juan Carlos. Análisis de sensibilidad de un proyecto de reciclaje de llantas. Bogotá D.C., 2013.

Boletín Técnico N°3. Mejoras Mecánicas de las mezclas asfálticas con GCR. Instituto de Desarrollo Urbano DU, Bogotá D.C. 2015

CACERES, María. Diseño de mezclas asfálticas. Capítulo 1. Estado del arte. Universidad de las Américas Puebla (UDLAP). México, 2009. Disponible en: <<http://catarina.udlap.mx/>>

Capitulo IV: Diseño de Mezclas Asfálticas: Diseño de Mezclas Asfálticas en caliente Introducción. [En línea]. < <http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1130180831181.pdf> > [citado en 10 de Julio de 2018].

DÍAZ, Cesar y CASTRO, Liliana. Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá. Monografía Ingeniero Civil. Bogotá D.C., Universidad Santo Tomas, 2017.

DUEÑAS, Ana María y CALUME, Sinuhe. Recopilación y análisis sobre el uso del grano de caucho modificado (GCM) para la utilización por vía seca en el diseño de carpetas asfálticas en Bogotá. Monografía Ingeniero Civil. Bogotá D.C., Universidad Santo Tomas, 2017.

Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras INVIAS. Capítulo 4. Pavimentos asfálticos. Artículo 450. Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá D.C. 2013. p.1

GALLEGO, Juan. Mezclas bituminosas con polvo de neumático. Una solución técnica y ambiental. [Diapositivas]. Valencia. 2013.

GALLEGO, Juan. Tecnologías de mezclas bituminosas con caucho de neumáticos. Experiencias y normativa española. [Diapositivas]. Rosario - Santa Fe, 2008.

GÓMEZ LÓPEZ, José Antonio. Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas. México, Sanfandila, 2004. [En línea] <<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/disenio-asfalto.pdf>>

GRUAS, Josep. Efecto de la utilización de mezclas bituminosas con polvo de neumático sobre las características funcionales del pavimento. Tesis de Especialización. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

HIGUERA SANDOVAL, Carlos Hernando. Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Volumen I y II. Colombia 2010. (Ingeniería y Tecnología, Ingeniería Civil, Ingeniería del Transporte). Ed. Imprenta Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

-----,----- . Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras. Volumen I y II. Colombia 2010. (Ingeniería y Tecnología, Ingeniería Civil, Ingeniería del Transporte). Ed. Imprenta Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

HUANG, Yang H. Pavement Analysis and Design. New Jersey, USA: Prentice Hall. 1993.

INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO. Especificaciones técnicas generales de materiales y construcción para proyectos de infraestructura vial y de espacio público. Bogotá, IDU, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá: INIVAS, 2013.

KRAEMER, Carlos, et al. Mezclas bituminosas. En: Ingeniería de Carreteras volumen II. Madrid: McGrawHill, 2004.

LEIVA VILLACORTA, Fabricio. Estudio del módulo dinámico complejo de mezclas asfálticas. Desarrollo de curvas maestras. Universidad de Costa Rica. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos estructurales (LANAMME).

LOPEZ NOBOA, Nathaly Sofía. VEGA NARANJO, Carlos Eduardo. Caracterización de mezclas asfálticas en caliente mediante la obtención de curvas maestras de módulo dinámico. Ecuador, Quito. 2014. Tesis de grado.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE. Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas. España, 2007.

NARANJO, BARRERA, Gloria, M. y CETINA, ACUÑA, Jhon F. Determinación de módulos dinámicos de mezclas asfálticas. Tunja 2008. Tesis de Pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

PADILLA RODRIGUEZ, Alejandro. Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Universidad politécnica de Cataluña. Disponible en el portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC: <https://upcommons.upc.edu>.

PEREZ BUITRAGO, Gonzalo, Método de diseño de mezclas asfálticas. Método Marshall. Diapositivas de clase. Tunja 2016.

PINEDA, YEIMS y REY, FELIPE: Mezclas asfálticas drenante modificada con grano de caucho reciclado. Bogotá 2012. Tesis de Pregrado. Universidad Piloto de Colombia.

Procesos de fabricación de llantas. Michelin. Disponible en www.michelin.com.mx

RAHMAN, Mujibur. Characterisation of dry process crumb rubber modified asphalt mixtures. University of Nottingham. 2004.

RAMÍREZ, Náyade Irene. Estudio de la utilización de caucho de neumáticos en mezclas asfálticas en caliente mediante proceso seco. Memoria Ingeniero civil. Santiago de Chile. Universidad de Chile. Departamento de ingeniería civil, 2006.

RONDÓN, Hugo. Mezclas asfálticas modificadas con grano de caucho de llanta (GCR): Estado del conocimiento y análisis de utilización en Colombia. VI Jornadas de Pavimentos y Mantenimiento vial. Bogotá D.C., 2011.

RONDON QUINTANA, Hugo A. Ahuellamiento y Fatiga mezclas Asfálticas, 2012. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2012

SIERRA, Brianda y COSTILLA, Jesús. Consumo y reciclaje de neumáticos. [Diapositivas]. San Luis de Potosí, 2014.

STATE OF CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Asphalt rubber usage guide. Sacramento, CA. 2003.

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas. Informe final contrato IDU-366-01. Alcaldía Mayor de Bogotá D.C. 2002.

Y. Richard Kim. Typical Dynamic moduli for North Carolina asphalt concrete mixtures. North Carolina State University. Raleigh, NC. 2005

ANEXOS

ANEXO A. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS

ANEXO A-1. Granulometría de Grava 3/4"



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS

ENSAYO

Análisis Granulométrico de los Agregados

NORMA DE ENSAYO

INV. E - 213 - 13

OBRA: **Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12**

CANTERA: Triturados Paz del Río

FECHA: Primer Semestre 2018

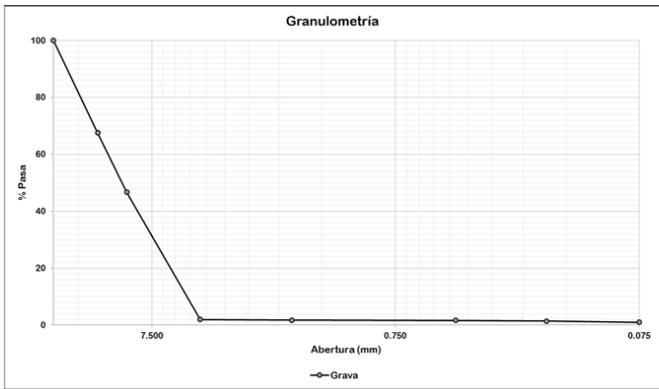
DESCRIPCIÓN: Material Granular - Grava 3/4"

PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Peso Total (g)

 3355

GRANULOMETRIA - GRAVA					
Tamiz	Abert. (mm)	Peso Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Pasa (%)
3/4"	19.0	0	0	0	100
1/2"	12.5	1056.8	1056.8	31.50	68.50
3/8"	9.5	837.1	1893.9	24.95	43.55
#4	4.75	1399	3292.9	41.70	1.85
#10	2.0	5.1	3298	0.15	1.70
#40	0.425	2.1	3300.1	0.06	1.64
#80	0.18	2.3	3302.4	0.07	1.57
#200	0.075	2.1	3304.5	0.06	1.51
Fondo	-	50.5	3355	1.51	0
Σ		3355	-	100	-



Granulometria

% Pasa

Abertura (mm)

—○— Grava

Observaciones: Se realiza análisis granulométrico al material grueso, grava proveniente de la cantera Triturados Paz del Río

Laboratorista: Nicolás Olarte Riaño

Laboratorista: Rubén David Soler

Supervisó: Ing. José Manuel Sierra

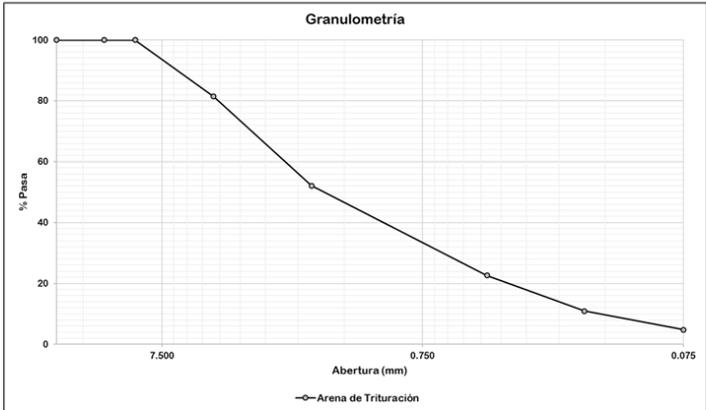
Revisó: Ing. Carlos H. Higuera Sandoval

ANEXO A-2. Granulometría de Arena de trituración

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Análisis Granulométrico de los Agregados
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 213 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Material Granular - Arena de Trituración		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Peso Total (g)	2404
----------------	------

GRANULOMETRIA - Arena de Trituración					
Tamiz	Abert. (mm)	Peso Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Pasa (%)
3/4"	19.0	0.00	0	0	100.0
1/2"	12.5	0.00	0	0.00	100.0
3/8"	9.5	0.00	0	0.00	100.0
#4	4.75	722.2	722.2	30.04	70.0
#10	2.0	498.3	1220.5	20.73	49.2
#40	0.425	638.9	1859.4	26.58	22.7
#80	0.18	290.9	2150.3	12.10	10.6
#200	0.075	128.0	2278.3	5.32	5.2
Fondo	-	125.7	2404	5.23	0.0
Σ		2404	-	100	-



Granulometría

—○— Arena de Trituración

Observaciones: Se realiza análisis granulométrico a material producto de trituración proveniente de la cantera Triturados Paz del Río

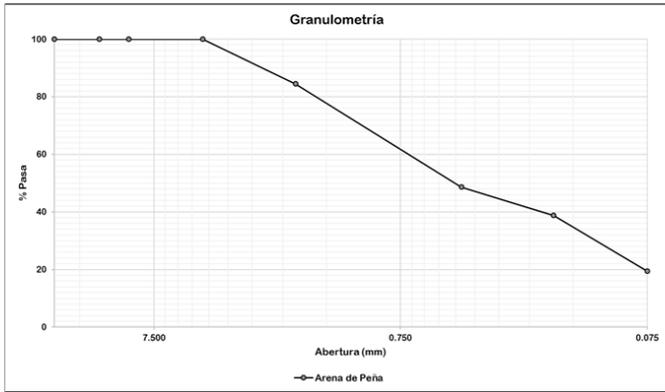
Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-3. Granulometría de Arena de peña

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Análisis Granulométrico de los Agregados
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 213 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Material Granular - Arena de Peña		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Peso Total (g)	2115.8
----------------	--------

GRANULOMETRIA - Arena de Peña					
Tamiz	Abert. (mm)	Peso Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Pasa (%)
3/4"	19.0	0.00	0	0	100.0
1/2"	12.5	0.00	0	0.00	100.0
3/8"	9.5	0.00	0	0.00	100.0
#4	4.75	136.0	136	6.43	93.6
#10	2.0	268.9	404.9	12.71	80.9
#40	0.425	681.2	1086.1	32.20	48.7
#80	0.18	345.7	1431.8	16.34	32.3
#200	0.075	331.2	1763	15.65	16.7
Fondo	-	352.8	2115.8	16.67	0.0
Σ		2115.8	-	100	-



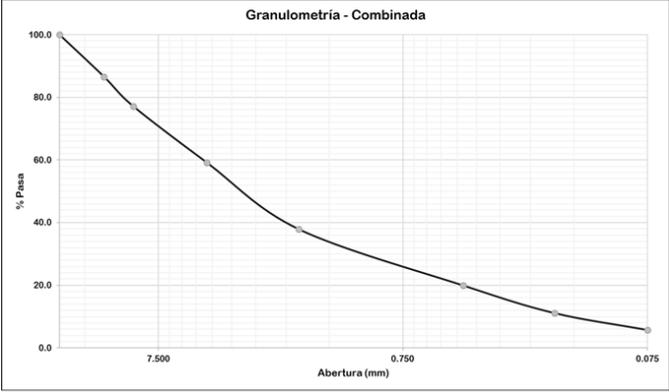
Granulometría

—○— Arena de Peña

Observaciones: Se realiza análisis granulométrico a material fino del acopio de arena de peña proveniente de la cantera Triturados Paz del Río

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-4. Granulometría materiales combinados

		UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	ENSAYO Análisis Granulométrico de los Agregados NORMA DE ENSAYO INV. E - 213 - 13		
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12					
CANTERA: Triturados Paz del Río DESCRIPCIÓN: Material Granular - Combinada		FECHA: Primer Semestre 2018 PROPÓSITO: Caracterización Agregados			
Peso Total (g) 2145					
GRANULOMETRIA - Combinada					
Tamiz	Abert. (mm)	Peso Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Pasa (%)
3/4"	19.0	0.00	0	0	100.0
1/2"	12.5	287.50	287.5	13.40	86.6
3/8"	9.5	201.70	489.2	9.40	77.2
#4	4.75	385.6	874.8	17.98	59.2
#10	2.0	456.3	1331.1	21.27	37.9
#40	0.425	385.6	1716.7	17.98	20.0
#80	0.18	188.9	1905.6	8.81	11.2
#200	0.075	115.6	2021.2	5.39	5.8
Fondo	-	123.8	2145	5.77	0.0
Σ		2145	-	100	-
					
Observaciones: Se realiza análisis granulométrico a la combinación de los tres materiales utilizados (Grava, Arena de trituración, arena de peña) todos provenientes de la cantera Triturados Paz del Río					
Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>		Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>			
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>		Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>			

ANEXO A-5. Desgaste en máquina de Los Ángeles

	UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA	ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	Resistencia a la degradación Máquina de Los Angeles (Tamaños < 1 1/2")
		NORMA DE ENSAYO INV. E - 218 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Pasa		Retenido		Granulometría
mm	(pulg)	mm	(pulg)	B
19.0	3/4"	12.5	1/2"	2500 ± 10
12.5	1/2"	9.5	3/8"	2500 ± 10
TOTALES				5000 ± 10

	Prueba No. 1	Prueba No. 2
Masa Inicial [P1], g	5000	5000
Masa Después N° 12 [P2], g	4122.1	4206.4
<i>Desgaste</i>	17.6%	15.9%

$$Desgaste, \% = \frac{P1 - P2}{P1} * 100$$

<i>Desgaste</i>	16.7%
-----------------	--------------

Observaciones: Se realiza ensayo de resistencia al desgaste en Máquina de Los Ángeles empleando la granulometría B en la cual se utilizan 11 esferas

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-6. Resistencia a abrasión en Micro Deval

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	<i>Resistencia a la abrasión Micro Deval</i>
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 238 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Pasa		Retenido		Granulometría
mm (pulg)	mm (pulg)	mm (pulg)	mm (pulg)	
				7.3
12.5	1/2"	9.5	3/8"	750
9.5	3/8"	6.3	1/4"	375
6.3	1/4"	4.75	No. 4	375
TOTALES				1500 ± 5

	Prueba No. 1	Prueba No. 2
Masa Seca Antes [A], g	1500	1500
Masa Seca Después [B], g	1294.3	1289.4
Perdida por Abrasión	13.7%	14.0%

$$Perdida, \% = \frac{A - B}{A} * 100$$

Perdida por Abrasión	13.9%
----------------------	--------------

Observaciones: Se realiza ensayo de resistencia del agregado grueso a la abrasión empleando el Micro Deval con la granulometría de ensayo 7.3 la cual tiene una duración de 105 minutos.

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-7. Resistencia mecánica por 10% de finos

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Determinación del valor de 10% de Finos
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	INV. E - 224 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

	Prueba No. 1	Prueba No. 2
Carga de Ensayo, kN	107.42	105.77
Peso Muestra [M1], g	2546.2	2472.7
Peso Pasa No. 8 [M2], g	199.1	197.4
Peso Retenido No. 8 [M3], g	2345.8	2274.3

Criterios de Aceptación

$M2 + M3 = \pm 10$	2544.9	<input checked="" type="checkbox"/>	2471.7	<input checked="" type="checkbox"/>
$M2/M1 = 7.5\% - 12.5\%$	7.8%	<input checked="" type="checkbox"/>	8.0%	<input checked="" type="checkbox"/>

Pasa No. 8 [m]	7.82%	7.98%
Máxima Fuerza [F], kN	127.2	123.6

Máxima Fuerza [F], kN	125.4
-----------------------	--------------

Observaciones: Se realiza ensayo de determinación del contenido de 10% de finos, mediante la aplicación de carga a compresión en la máquina universal.

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-8. Solidez en sulfato de magnesio

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Solidez en Sulfato de Magnesio
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 220 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Se utilizó una solución de sulfato de magnesio (MgSO₄), durante 5 ciclos de inmersión - secado

$$Perdida = \frac{Masa\ Inicial - Masa\ Final}{Masa\ Inicial}$$

Agregado Grueso							
Tamiz, Pulg (mm)		Peso Inicial, g	Peso Final, g	% Perdida	Perdida, g	Gradación	Perd. Corregida
3/4" (19.0 mm)	1/2" (12.5 mm)	670	663.3	1.0%	6.7	52%	0.52%
1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	330	321.9	2.5%	8.1	25%	0.62%
3/8" (9.5 mm)	No. 4 (4.75 mm)	300	296.5	1.2%	3.5	23%	0.27%
Total		1300	1281.7		18.3	100%	1.41%

% Perdidas	1.4%
------------	------

Agregado Fino							
Tamiz, Pulg (mm)		Peso Inicial, g	Peso Final, g	% Perdida	Perdida, g	Gradación	Perd. Corregida
3/8" (9.5 mm)	No. 4 (4.75 mm)	100	98.5	1.5%	1.5	25%	0.38%
No. 4 (4.75 mm)	No. 10 (2.0 mm)	100	98.6	1.4%	1.4	25%	0.35%
No. 10 (2.0 mm)	No. 40 (0.425 mm)	100	99.1	0.9%	0.9	25%	0.23%
No. 40 (0.425 mm)	No. 80 (0.180 mm)	100	97.5	2.5%	2.5	25%	0.63%
Total		400	393.7		6.3	100.00%	1.58%

% Perdidas	1.6%
------------	------

Observaciones: Se realiza ensayo de solidez empleando una solución de sulfato de Magnesio, durante 5 ciclos

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-9. Porcentaje de caras fracturadas

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS		Porcentaje de partículas fracturadas
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		NORMA DE ENSAYO
		INV. E - 227 - 13	
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12			
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados	

$$P = \frac{F}{F + N} * 100$$

		Prueba No. 1	Prueba No. 2
Masa Total, g	M	3000	2000
Masa Fracturadas, g	F	2998.4	1997.8
Masa No Fracturadas, g	N	0	0
Caras Fracturadas	P	100.0%	100.0%

Caras Fracturadas	P	100%
-------------------	----------	------

Observaciones: Se realiza ensayo de caras fracturadas, se obtiene un 100% debido a que el agregado es netamente producto de la trituración mecánica.

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-10. Índices de aplanamiento y alargamiento

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Índices de Aplanamiento y Alargamiento
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 230 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Índice de Aplanamiento		$IAi = \frac{mi}{Ri} * 100$	$IA = \frac{M_3}{M_1} * 100$
Tamiz, pulg (mm)	Peso Retenido, g	% Retenido	Peso Planas, g
3/4" (19.0) 1/2" (12.5)	1056.8	38.8%	102.3
1/2" (12.5) 3/8" (9.5)	842.1	30.9%	95.6
3/8" (9.5) 1/4" (6.30)	825.6	30.3%	89.6
Σ	2724.5	100%	287.5

M1	2724.5
M3	287.5

IA	10.6%
-----------	--------------

Índice de Alargamiento		$ILi = \frac{ni}{Ri} * 100$	$IL = \frac{M_{13}}{M_{11}} * 100$
Tamiz, pulg (mm)	Peso Retenido, g	% Retenido	Peso Largas, g
3/4" (19.0) 1/2" (12.5)	1056.8	38.8%	72.3
1/2" (12.5) 3/8" (9.5)	842.1	30.9%	60.7
3/8" (9.5) 1/4" (6.30)	825.6	30.3%	38.9
Σ	2724.5	100%	171.9

M11	2724.5
M13	171.9

IL	6.3%
-----------	-------------

Observaciones: Se realiza ensayo de alargamiento y aplanamiento de los agregados, no es necesario descartar ninguna fracción debido a que ninguna es inferior a un porcentaje retenido al 5%.

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-11. Angularidad de la fracción fina

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA			ENSAYO	
	FACULTAD DE INGENIERÍA		Contenido de vacíos (Fino), Textura superficial [Angularidad]	
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS		NORMA DE ENSAYO	
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 239 - 13	
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12				
CANTERA: Triturados Paz del Río			FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Agregado Fino			PROPÓSITO: Caracterización Agregados	

Gradación Estandar			Gravedad Específica	
Tamiz			Temperatura de Ensayo	
Pasa	Retiene	Masa, g		
No. 8	No. 16	44	2.654	
No. 16	No. 30	57	19.5 °C	
No. 30	No. 50	72		
No. 50	No. 50	17		
		190		

Prueba No.	1	2	3	4
Cilindro + Vidrio, g	284.8	284.6	284.7	284.6
Cilindro + Agua + Vidrio, g	383.6	383.8	383.6	383.6
Cilindro + Agregado, g	420.8	421	421.4	421.1

Prueba No.	1	2	3	4
Masa Neta del Agua [M]	98.8	99.2	98.9	99
Densidad a T° [D]	998.30	998.30	998.30	998.30
Volumen [V]	98.97	99.37	99.07	99.17
Masa Neta del Agregado [F]	136	136.4	136.7	136.5

% de Vacíos [U]	1	2	3	4
%	48.2%	48.3%	48.0%	48.1%

% de Vacíos [Us]	48.2%
-------------------------	--------------

Observaciones: Se realiza ensayo de angularidad empleando una gradación estandar por el método A según indica la norma de ensayo, se realizan 4 pruebas

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-12. Limpieza superficial del agregado grueso

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	<i>Limpieza Superficial del Agregado Grueso</i>
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 237 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Para la masa inicial se toma una cantidad entre 200 y 500 veces el diámetro de la fracción de ensayo, en este caso Tamiz No. 4 (4.75 mm)

	Prueba No. 1	Prueba No. 2
Masa Humeda [Mh], g	1183.40	1190.20
Masa Seca [Ms], g	1183.1	1189.7
Masa Humeda Ensayo [Mhe], g	1185.20	1184.70
Masa Seca [m], g	1181.70	1179.80

Se calcula la humedad para cada una de las fracciones de ensayo.

Humedad [W]	0.03%	0.04%
Masa Seca Ensayo [Mse], g	1184.9	1184.2
Impurezas [I]	3.2	4.4
Coefficiente de limpieza	0.27%	0.37%

Coefficiente de limpieza	0.32%
---------------------------------	--------------

Observaciones: Se realiza ensayo de limpieza superficial sobre una fracción de agregado grueso, empleando una masa inicial que se encuentre entre 200-500 veces D (4.75 mm).

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-13. Equivalente arena de suelos

	UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	ENSAYO <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">Equivalente de Arena de suelos</div> NORMA DE ENSAYO <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; text-align: center;">INV. E - 133 - 13</div>																																												
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12																																														
CANTERA: Triturados Paz del Río DESCRIPCIÓN: Agregado Combinado		FECHA: Primer Semestre 2018 PROPÓSITO: Caracterización Agregados																																												
$\text{Equivalente Arena [EA]} = \frac{\text{Lectura Arena}}{\text{Lectura Arcilla}} * 100$ <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Ensayo 1</th> <th style="text-align: center;">Cilindro No.</th> <th style="text-align: center;">Arcilla</th> <th style="text-align: center;">Arena</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">EA</th> <th rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">67%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">6.7</td> <td style="text-align: center;">4.4</td> <td style="text-align: center;">65.7%</td> <td style="text-align: center;">66%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">6.9</td> <td style="text-align: center;">4.5</td> <td style="text-align: center;">65.2%</td> <td style="text-align: center;">66%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">6.8</td> <td style="text-align: center;">4.5</td> <td style="text-align: center;">66.2%</td> <td style="text-align: center;">67%</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">Ensayo 2</th> <th style="text-align: center;">Cilindro No.</th> <th style="text-align: center;">Arcilla</th> <th style="text-align: center;">Arena</th> <th colspan="2" style="text-align: center;">EA</th> <th rowspan="4" style="text-align: center; vertical-align: middle;">64%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">1</td> <td style="text-align: center;">7.6</td> <td style="text-align: center;">4.9</td> <td style="text-align: center;">64.5%</td> <td style="text-align: center;">65%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">2</td> <td style="text-align: center;">7.3</td> <td style="text-align: center;">4.7</td> <td style="text-align: center;">64.4%</td> <td style="text-align: center;">65%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3</td> <td style="text-align: center;">7.5</td> <td style="text-align: center;">4.5</td> <td style="text-align: center;">60.0%</td> <td style="text-align: center;">60%</td> </tr> </tbody> </table> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">Equivalente Arena</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block; margin-left: 20px;">66%</div> </div>			Ensayo 1	Cilindro No.	Arcilla	Arena	EA		67%	1	6.7	4.4	65.7%	66%	2	6.9	4.5	65.2%	66%	3	6.8	4.5	66.2%	67%	Ensayo 2	Cilindro No.	Arcilla	Arena	EA		64%	1	7.6	4.9	64.5%	65%	2	7.3	4.7	64.4%	65%	3	7.5	4.5	60.0%	60%
Ensayo 1	Cilindro No.	Arcilla		Arena	EA		67%																																							
	1	6.7		4.4	65.7%	66%																																								
	2	6.9		4.5	65.2%	66%																																								
	3	6.8	4.5	66.2%	67%																																									
Ensayo 2	Cilindro No.	Arcilla	Arena	EA		64%																																								
	1	7.6	4.9	64.5%	65%																																									
	2	7.3	4.7	64.4%	65%																																									
	3	7.5	4.5	60.0%	60%																																									
Observaciones: Se realiza ensayo de equivalente arena sobre el agregado fino combinado, se realizaron 2 pruebas Se empleo la solución stock de cloruro de calcio y se realizó agitación mecánica																																														
Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u> Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>		Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u> Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>																																												

ANEXO A-14. Valor de azul de metileno

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Valor de Azul de Metileno
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 235 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río	FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Agregado Fino	PROPÓSITO: Caracterización Agregados	

	Prueba No. 1	Prueba No. 2
Volumen Añadido [V1], ml	16	14
Masa Agregado [M1], g	30	30

$$VA = \frac{V1}{M1} * 10$$

Azul de Metileno [VA]	5.3	4.7
-----------------------	-----	-----

Valor de Azul de Metileno [VA]	5.0
--------------------------------	-----

Observaciones: Se realiza ensayo de azul de metileno, empleando material Pasa No. 200

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-15. Gravedad específica del agregado grueso

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Densidad, gravedad específica y absorción del agregado grueso
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 223 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río	FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Agregado Grueso	PROPÓSITO: Caracterización Agregados	

Masa Sat. Superf. Seca SSS, g	B	3044.2
Masa Aparente Sumergida, g	C	1877.6
Masa seca al aire, g	A	3029.5

$$G_{S_{bulk}} = \frac{A}{B - C} \qquad G_{S_{SSS}} = \frac{B}{B - C} \qquad G_{S_{Aparente}} = \frac{A}{A - C}$$

	Gs	γ (g/cm ³)
Seca al Horno (Bulk)	2.597	2.589
Sat. Superf. Seca (SSS)	2.609	2.602
Aparente	2.630	2.622

$$Absorción = \frac{B - A}{A} * 100$$

% Absorción	0.49%
-------------	-------

Observaciones: Se realiza ensayo de gravedad específica para el agregado grueso, para el cálculo del peso específico se utiliza la densidad del agua a 25 °C de 0.997 g/cm³

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO A-16. Gravedad específica del agregado fino

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	Densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO
		INV. E - 222 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Fino		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Masa Inicial, g	S	300
Masa Picno + Agua, g	B	654.1
Masa Picno + Agua + Muestra, g	C	842.7
Masa seca al aire, g	A	295.7

$$G_{S_{bulk}} = \frac{A}{B + S - C} \quad G_{S_{SSS}} = \frac{S}{B + S - C} \quad G_{S_{Aparente}} = \frac{A}{B + A - C}$$

	Gs	γ (g/cm ³)
Seca al Horno (Bulk)	2.654	2.646
Sat. Superf. Seca (SSS)	2.693	2.685
Aparente	2.761	2.753

$$Absorción = \frac{S - A}{A} * 100$$

% Absorción	1.45%
-------------	-------

Observaciones: Se realiza ensayo de gravedad específica para el agregado fino mediante proceso gravimétrico para el cálculo del peso específico se utiliza la densidad del agua a 25 °C de 0.997 g/cm³

Laboratorista: Nicolás Olarte Riaño	Supervisó: Ing. José Manuel Sierra
Laboratorista: Rubén David Soler	Revisó: Ing. Carlos H. Higuera Sandoval

ANEXO A-17. Gravedad específica del filler

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	Densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO
		INV. E - 222 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
CANTERA: Triturados Paz del Río		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Fino-Filler		PROPÓSITO: Caracterización Agregados

Masa Inicial, g	S	300
Masa Picno + Agua, g	B	654.1
Masa Picno + Agua + Muestra, g	C	839.2
Masa seca al aire, g	A	292.8

$$G_{S_{bulk}} = \frac{A}{B + S - C} \quad G_{S_{SSS}} = \frac{S}{B + S - C} \quad G_{S_{Aparente}} = \frac{A}{B + A - C}$$

	Gs	γ (g/cm ³)
Seca al Horno (Bulk)	2.548	2.541
Sat. Superf. Seca (SSS)	2.611	2.603
Aparente	2.719	2.711

$$Absorción = \frac{S - A}{A} * 100$$

% Absorción	2.46%
-------------	-------

Observaciones: Se realiza ensayo de gravedad específica para el Filler mediante proceso gravimétrico para el cálculo del peso específico se utiliza la densidad del agua a 25 °C de 0.997 g/cm³

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

ANEXO B-1. Gravedad específica del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA																							
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO																					
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	Densidad de materiales bituminosos (Método del Picnómetro)																					
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO INV. E - 707 - 13																					
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12																							
PLANTA: MPI Ltda.		FECHA: Primer Semestre 2018																					
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100		PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico																					
<p>Se realiza la determinación de la densidad mediante el método del picnómetro</p> <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Prueba No.</i></th> <th style="text-align: center;">1</th> <th style="text-align: center;">2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Picnómetro Vacío [A]</i></td> <td style="text-align: center;">15.61</td> <td style="text-align: center;">15.62</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Picnómetro + Agua [B]</i></td> <td style="text-align: center;">40.32</td> <td style="text-align: center;">40.35</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Picnómetro + 3/4 Asfalto [C]</i></td> <td style="text-align: center;">28.36</td> <td style="text-align: center;">29.91</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Picnómetro Lleno [D]</i></td> <td style="text-align: center;">40.45</td> <td style="text-align: center;">40.60</td> </tr> </tbody> </table> $G_s = \frac{C - A}{(B - A) - (D - C)}$ <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Gravedad Específica [Gs]</i></td> <td style="text-align: center;">1.010</td> <td style="text-align: center;">1.018</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Densidad Asfalto [D], g/cm³</i></td> <td style="text-align: center;">1.007</td> <td style="text-align: center;">1.015</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <u>Gravedad Específica [Gs]</u> 1.014 </p>			<i>Prueba No.</i>	1	2	<i>Picnómetro Vacío [A]</i>	15.61	15.62	<i>Picnómetro + Agua [B]</i>	40.32	40.35	<i>Picnómetro + 3/4 Asfalto [C]</i>	28.36	29.91	<i>Picnómetro Lleno [D]</i>	40.45	40.60	<i>Gravedad Específica [Gs]</i>	1.010	1.018	<i>Densidad Asfalto [D], g/cm³</i>	1.007	1.015
<i>Prueba No.</i>	1	2																					
<i>Picnómetro Vacío [A]</i>	15.61	15.62																					
<i>Picnómetro + Agua [B]</i>	40.32	40.35																					
<i>Picnómetro + 3/4 Asfalto [C]</i>	28.36	29.91																					
<i>Picnómetro Lleno [D]</i>	40.45	40.60																					
<i>Gravedad Específica [Gs]</i>	1.010	1.018																					
<i>Densidad Asfalto [D], g/cm³</i>	1.007	1.015																					
Observaciones: Se realiza ensayo de gravedad específica para cemento asfáltico AC 80-100 mediante el procedimiento del picnómetro. Se utiliza la densidad del agua a 25 °C de 0.997 g/cm ³																							
Laboratorista: Nicolás Olarte Riaño	Supervisó: Ing. José Manuel Sierra																						
Laboratorista: Rubén David Soler	Revisó: Ing. Carlos H. Higuera Sandoval																						

ANEXO B-2. Penetración del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Penetración de materiales bituminosos
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 706 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
PLANTA: MPI Ltda.	FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100	PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico	

Se realizó el ensayo de penetración a una temperatura de 25 °C.

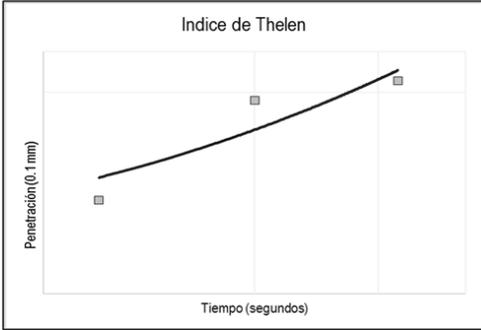
	<i>Prueba No. 1</i>	<i>Prueba No. 2</i>
	Lectura (0.1 mm)	
1	98.20	97.20
2	97.30	96.60
3	96.80	96.20
Penetración [P]	97.4	96.7

Penetración [P] 97

Se calcula el índice de Thelen INV.E-708-13, tomando penetraciones a los 3, 5 y 8 segundos.

Tiempo (s)	Penetración (0.1 mm)
3	65.6
5	97.4
8	104.2
m	6.67

Índice de Thelen, n	1.36
----------------------------	-------------



Asfalto perteneciente al grupo 2, reológicamente de comportamiento visco-elástico.

Observaciones: Se realiza ensayo de penetración para cemento asfáltico AC 80-100 registrando lecturas a los 5 segundos de penetración. Se desarrolla el ensayo a 25 °C.

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO B-3. Punto de ablandamiento del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA	
	ENSAYO Punto de Ablandamiento Anillo y Bola (R&B)
FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO INV. E - 712 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12	
PLANTA: MPI Ltda. DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100	FECHA: Primer Semestre 2018 PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico

	<i>Prueba No. 1</i>	<i>Prueba No. 2</i>
	<i>Temperatura °C</i>	<i>Temperatura °C</i>
<i>Bola 1</i>	45.5	45
<i>Bola 2</i>	46	45
TR&B, °C	45.8	45.0
TR&B, °C	45.4	

Se calcula el índice de penetración INV. E-724-13

<i>Ensayo</i>	<i>Valor</i>
<i>Punto de Ablandamiento, °C</i>	45.4
<i>Penetración, 0.1 mm</i>	97.1
<i>f</i>	2.25
Índice de Penetración [IP]	-0.76

Se obtiene in valor de IP aceptable correspondiente al grupo 3 (IP entre +1 y -1), al cual pertenecen la mayoría de cementos asfálticos utilizados en construcción de carreteras.

Observaciones: Se realiza ensayo de punto de ablandamiento para cemento asfáltico AC 80-100

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO B-4. Ductilidad del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA																						
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO																				
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	Ductilidad de los materiales asfálticos																				
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		NORMA DE ENSAYO																				
		INV. E - 702 - 13																				
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12																						
PLANTA: MPI Ltda.	FECHA: Primer Semestre 2018																					
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100	PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico																					
<p>Se realizan dos pruebas a temperatura de 25 °C y velocidad de 5 cm/min.</p> <table border="1" style="margin: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;"><i>Prueba #</i></th> <th style="text-align: center;"><i>1</i></th> <th style="text-align: center;"><i>2</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Probeta 1</i></td> <td style="text-align: center;">121.0</td> <td style="text-align: center;">123.0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Probeta 2</i></td> <td style="text-align: center;">118.0</td> <td style="text-align: center;">120.0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Probeta 3</i></td> <td style="text-align: center;">122.0</td> <td style="text-align: center;">118.0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Probeta 4</i></td> <td style="text-align: center;">120.0</td> <td style="text-align: center;">123.0</td> </tr> </tbody> </table> <table style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">Ductilidad [D], cm</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">120.3</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">121.0</td> </tr> </table> <table style="margin: auto;"> <tr> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">Ductilidad [D], cm</td> <td style="text-align: center; border: 1px solid black;">120.6</td> </tr> </table> <p style="text-align: center;">El alargamiento máximo que permite registrar el ductilímetro del LSP es de 123 cm.</p>			<i>Prueba #</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>Probeta 1</i>	121.0	123.0	<i>Probeta 2</i>	118.0	120.0	<i>Probeta 3</i>	122.0	118.0	<i>Probeta 4</i>	120.0	123.0	Ductilidad [D], cm	120.3	121.0	Ductilidad [D], cm	120.6
<i>Prueba #</i>	<i>1</i>	<i>2</i>																				
<i>Probeta 1</i>	121.0	123.0																				
<i>Probeta 2</i>	118.0	120.0																				
<i>Probeta 3</i>	122.0	118.0																				
<i>Probeta 4</i>	120.0	123.0																				
Ductilidad [D], cm	120.3	121.0																				
Ductilidad [D], cm	120.6																					
Observaciones: Se realiza ensayo de ductilidad para cemento asfáltico AC 80-100 empleando el ductilímetro a 25 °C.																						
Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>																					
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>																					

ANEXO B-5. Viscosidad Brookfield del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	Viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Brookfield
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO
		INV. E - 717 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
PLANTA: MPI Ltda.		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100		PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico

Temperatura °C	Viscosidad		Promedio Pa.s
	cP	Pa.s	
60	131216	131.22	131.1
	131114	131.11	
	130954	130.95	
80	12616	12.62	12.53
	12543	12.54	
	12423	12.42	
100	2034	2.034	2.02
	2025	2.025	
	2000	2.000	
120	593	0.593	0.58
	575	0.575	
	567	0.567	
140	220	0.220	0.22
	220	0.220	
	220	0.220	
160	95	0.095	0.08
	86	0.086	
	71	0.071	

Se convierten cP a Pa.s, multiplicando por 0.001

Temperatura	Compactación	134 °C
	Mezcla	145 °C

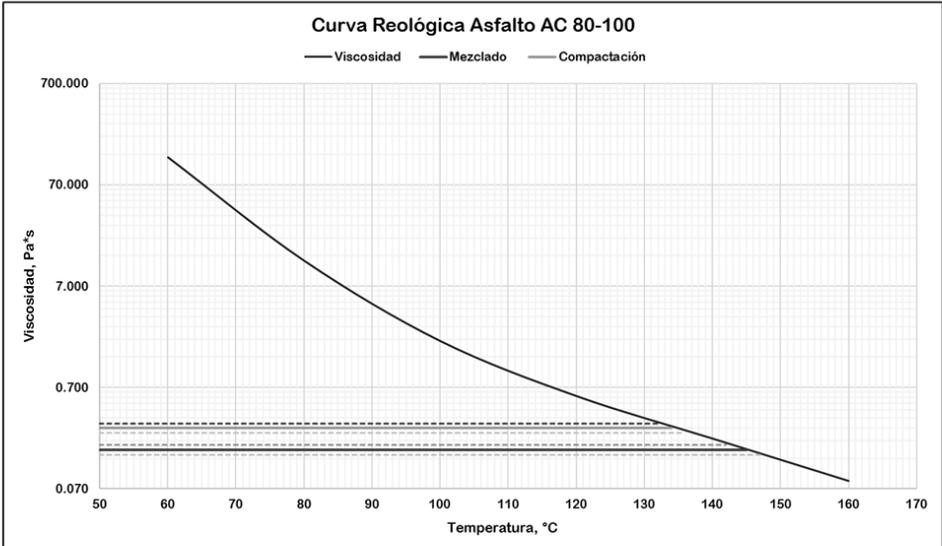
Observaciones: Se realiza ensayo de viscosidad empleando el viscosímetro Brookfield, manteniendo el % de torsión entre 5% y 95%

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO B-6. Curva reológica del asfalto AC 80-100

	UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	ENSAYO <i>Viscosidad del asfalto empleando el viscosímetro Brookfield</i> NORMA DE ENSAYO INV. E - 717 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
PLANTA: MPI Ltda.		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100		PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico

Curva Reológica Asfalto AC 80-100



Temperatura	Compactación	134 °C
	Mezcla	145 °C

Observaciones: Se realiza ensayo de viscosidad empleando el viscosímetro Brookfield, manteniendo el % de torsión entre 5% y 95%

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO B-7. Punto de ignición y llama AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA											
	FACULTAD DE INGENIERÍA	ENSAYO									
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	<i>Punto de Inflamación y combustión Copa abierta de Cleveland</i>									
	LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS	NORMA DE ENSAYO									
		INV. E - 709 - 13									
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12											
PLANTA: MPI Ltda.	FECHA: Primer Semestre 2018										
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100	PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th style="text-align: center;">Ensayo No. 1</th> <th style="text-align: center;">Ensayo No. 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Ignición, °C</i></td> <td style="text-align: center;">295</td> <td style="text-align: center;">294</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Llama, °C</i></td> <td style="text-align: center;">301</td> <td style="text-align: center;">298</td> </tr> </tbody> </table>				Ensayo No. 1	Ensayo No. 2	<i>Punto de Ignición, °C</i>	295	294	<i>Punto de Llama, °C</i>	301	298
	Ensayo No. 1	Ensayo No. 2									
<i>Punto de Ignición, °C</i>	295	294									
<i>Punto de Llama, °C</i>	301	298									
Se aplica corrección por presión barométrica en la ciudad de Tunja.											
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Presión Barométrica [K], kPa</i></td> <td style="text-align: center;">102.4</td> </tr> </table>			<i>Presión Barométrica [K], kPa</i>	102.4							
<i>Presión Barométrica [K], kPa</i>	102.4										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center;">Correcciones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Ignición, °C</i></td> <td style="text-align: center;">294.7</td> <td style="text-align: center;">293.7</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Llama, °C</i></td> <td style="text-align: center;">300.7</td> <td style="text-align: center;">297.7</td> </tr> </tbody> </table>			Correcciones			<i>Punto de Ignición, °C</i>	294.7	293.7	<i>Punto de Llama, °C</i>	300.7	297.7
Correcciones											
<i>Punto de Ignición, °C</i>	294.7	293.7									
<i>Punto de Llama, °C</i>	300.7	297.7									
<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Ignición, °C</i></td> <td style="text-align: center;">294</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>Punto de Llama, °C</i></td> <td style="text-align: center;">299</td> </tr> </table>			<i>Punto de Ignición, °C</i>	294	<i>Punto de Llama, °C</i>	299					
<i>Punto de Ignición, °C</i>	294										
<i>Punto de Llama, °C</i>	299										
Observaciones: Se realiza ensayo de punto de ignición y llama para cemento asfáltico AC 80-100 empleando la copa abierta de Cleveland.											
Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>										
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>										

ANEXO B-8. Envejecimiento RTFOT del asfalto AC 80-100

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Efecto del Calor y el aire sobre el asfalto en lamina delgada rotatoria RTFOT
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 720 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
PLANTA: MPI Ltda.	FECHA: Primer Semestre 2018	
DESCRIPCIÓN: Cemento Asfáltico AC 80-100	PROPÓSITO: Caracterización Cemento Asfáltico	

Perdida por calentamiento INV. E-720-13					
Prueba #	Masa Inicial, g	Masa Final, g	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Perdida por calentamiento</td> <td style="text-align: center;">0.3%</td> </tr> </table>	Perdida por calentamiento	0.3%
Perdida por calentamiento	0.3%				
Probeta 1	35.0	34.87			
Probeta 2	35.0	34.94			
Promedio	35.0	34.9			

Porcentaje de la penetración original después de calentamiento INV. E-706-13				
Prueba No. 1		Penetración [P] Residuo (0.1 mm)	54.4	
Lectura (0.1 mm)		Penetración [P] Original (0.1 mm)	97	
1	54.70	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">% de Penetración</td> <td style="text-align: center;">56.1%</td> </tr> </table>	% de Penetración	56.1%
% de Penetración	56.1%			
2	54.40			
3	54.10			

Incremento del punto de ablandamiento INV. E-712-13				
Prueba No. 1		TR&B, °C - Residuo	52.5	
Temperatura °C		TR&B, °C - Original	45.4	
Bola 1	52.4	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">TR&B, °C - Incremento</td> <td style="text-align: center;">7.1</td> </tr> </table>	TR&B, °C - Incremento	7.1
TR&B, °C - Incremento	7.1			
Bola 2	52.6			

Índice de envejecimiento (Viscosidad a 60 °C) INV. E-717-13				
Prueba No. 1		Viscosidad Residuo (Pa.s)	126.9	
Viscosidad Pa.s		Viscosidad Original (Pa.s)	131	
1	126.96	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Índice de Envejecimiento</td> <td style="text-align: center;">3.1%</td> </tr> </table>	Índice de Envejecimiento	3.1%
Índice de Envejecimiento	3.1%			
2	126.92			
3	126.74			

Observaciones: Se realiza ensayo de envejecimiento RTFOT para cemento asfáltico AC 80-100, durante 85 minutos a 63 °C

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO C. CARACTERIZACIÓN DEL GRANO DE CAUCHO RECICLADO

ANEXO C-1. Gravedad específica del GCR

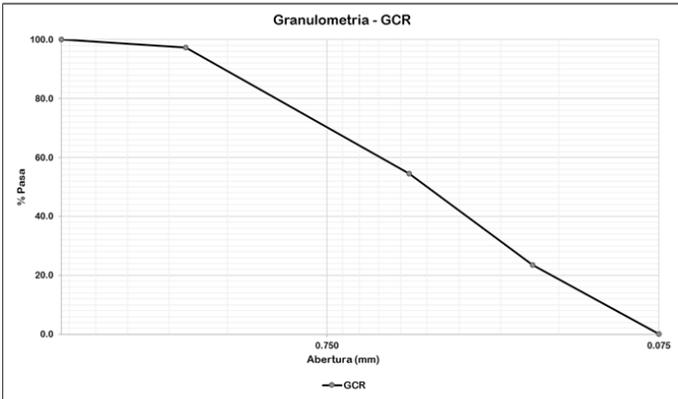
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		<i>ENSAYO</i>																										
	FACULTAD DE INGENIERÍA	<i>Densidad, gravedad específica y absorción del agregado fino</i>																										
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	<i>NORMA DE ENSAYO</i>																										
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 222 - 13																										
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahuellamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12																												
PLANTA: Reciclar - Rueda Verde	FECHA: Primer Semestre 2018																											
DESCRIPCIÓN: Agregado Grano de Caucho Reciclada GCR	PROPÓSITO: Caracterización Agregados																											
<p>Para el ensayo se emplea Grano de Caucho Reciclado que Pasa el tamiz No. 10.</p> <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Masa Inicial, g</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">S</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">100</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Masa Picno + Agua, g</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">B</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">652.7</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Masa Picno + Agua + Muestra, g</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">C</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">552.5</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Masa seca al aire, g</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">A</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">100</td> </tr> </table> $G_{S_{bulk}} = \frac{A}{B + S - C} \qquad G_{S_{SSS}} = \frac{S}{B + S - C} \qquad G_{S_{Aparente}} = \frac{A}{B + A - C}$ <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="border-bottom: 1px solid black;"></th> <th style="border-bottom: 1px solid black;">Gs</th> <th style="border-bottom: 1px solid black;">γ (g/cm³)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Seca al Horno (Bulk)</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.500</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.498</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Sat. Superf. Seca (SSS)</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.500</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.498</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">Aparente</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.500</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.498</td> </tr> </tbody> </table> $Absorción = \frac{S - A}{A} * 100$ <table style="margin-left: auto; margin-right: auto; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">% Absorción</td> <td style="text-align: center; border-bottom: 1px solid black;">0.00%</td> </tr> </table>			Masa Inicial, g	S	100	Masa Picno + Agua, g	B	652.7	Masa Picno + Agua + Muestra, g	C	552.5	Masa seca al aire, g	A	100		Gs	γ (g/cm ³)	Seca al Horno (Bulk)	0.500	0.498	Sat. Superf. Seca (SSS)	0.500	0.498	Aparente	0.500	0.498	% Absorción	0.00%
Masa Inicial, g	S	100																										
Masa Picno + Agua, g	B	652.7																										
Masa Picno + Agua + Muestra, g	C	552.5																										
Masa seca al aire, g	A	100																										
	Gs	γ (g/cm ³)																										
Seca al Horno (Bulk)	0.500	0.498																										
Sat. Superf. Seca (SSS)	0.500	0.498																										
Aparente	0.500	0.498																										
% Absorción	0.00%																											
Observaciones: Se realiza ensayo de gravedad específica para el GCR mediante el procedimiento utilizado para un agregado fino, con GCR pasa Tamiz No. 10. Se utiliza la densidad del agua a 25 °C de 0.997 g/cm ³																												
Laboratorista: Nicolás Olarte Riaño	Supervisó: Ing. José Manuel Sierra																											
Laboratorista: Rubén David Soler	Revisó: Ing. Carlos H. Higuera Sandoval																											

ANEXO C-2. Granulometría del GCR

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA		ENSAYO
	FACULTAD DE INGENIERÍA	Análisis Granulométrico de los Agregados
	ESCUELA DE TRANSPORTE Y VÍAS	NORMA DE ENSAYO
LABORATORIO DE SUELOS Y PAVIMENTOS		INV. E - 213 - 13
OBRA: Trabajo de Grado - Efecto del GCR en el ahueamiento de una mezcla asfáltica tipo MD-12		
PLANTA: Reciclair - Rueda Verde		FECHA: Primer Semestre 2018
DESCRIPCIÓN: Agregado Grano de Caucho Reciclada GCR		PROPÓSITO: Caracterización GCR

Peso Total (g)	2000
----------------	------

GRANULOMETRIA - GCR					
Tamiz	Abert. (mm)	Peso Retenido (g)	Retenido Acumulado (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Pasa (%)
#4	4.8	0.00	0	0	100.0
#10	2	53.40	53.4	2.67	97.3
#40	0.425	856.10	909.5	42.81	54.5
#80	0.18	621.5	1531.01	31.08	23.4
#200	0.1	467.3	1998.3	23.36	0.1
Fondo	0.05	1.7	2000	0.09	0.0
Σ		2000	-	100	-



Granulometria - GCR

Observaciones: Se realiza análisis granulométrico a grano de caucho reciclado GCR, proveniente de la planta Reciclair por medio de la corporación Rueda Verde

Laboratorista: <u>Nicolás Olarte Riaño</u>	Supervisó: <u>Ing. José Manuel Sierra</u>
Laboratorista: <u>Rubén David Soler</u>	Revisó: <u>Ing. Carlos H. Higuera Sandoval</u>

ANEXO D. DETERMINACIÓN DE LA TEMPERATURA DE MEZCLA

ANEXO D-1. Carta RT – Determinación T_{mix}

