ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA D.C.
INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO

CONTRATO
IDU – 366 - 01

OBJETO: ESTUDIO DE LAS MEJORAS MECÁNICAS DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON DESECHOS DE LLANTAS

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

INFORME FINAL
ORIGINAL

BOGOTA, D.C. SEPTIEMBRE 23 DE 2002

CONTENIDO

Pág.

1 RESUMEN 1
2 ANTECEDENTES 2
3 METODOLOGÍA 3
4 INTRODUCCIÓN 4
5 MARCO TEÓRICO 7
5.1 ASPECTOS GENERALES 7
5.1.1 Características fisicoquímicas de las llantas. 7
5.1.2 Las llantas desechadas. 9
5.1.3 Aplicación del GCR en los pavimentos. 12
5.1.3.1 Proceso ambiental. 17
5.1.3.2 Proceso criogénico. 18
5.1.3.3 Otros procesos. 19
5.1.4 Caucho molido utilizado. 19
5.2 PROCESO POR VÍA SECA 20
5.2.1 Tecnologías. 20
5.2.1.1 PlusRide. 20
5.2.1.2 Genérica. 21
5.2.1.3 Convencional. 21
5.2.2 Aplicaciones. 22
5.2.2.1 Mezclas asfálticas en caliente. 22
5.3 PROCESO POR VÍA HUMEDA 22
5.3.1 Modificación del ligante. 23
5.3.1.1 Tecnología por bachadas. 24
5.3.1.2 Tecnología continua. 25
5.3.1.3 Tecnología terminal. 25
5.3.2 Aplicaciones. 25
5.3.2.1 Sellantes. 25

5.3.2.2 Tratamientos superficiales. 26
5.3.2.3 Mezclas asfálticas en caliente. 28
6 PROCEDIMIENTO 29
6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES 29
6.1.1 Agregados pétreos. 29
6.1.1.1 Especificaciones INVIAS. 29
6.1.1.2 Agregados pétreos utilizados. 32
6.1.1.3 Ensayos realizados. 32
6.1.1.3.1 Determinación de materiales finos. 33
6.1.1.3.2 Resistencia al desgaste. 34
6.1.1.3.3 Pesos específicos y absorción, y masa unitaria. 34
6.1.1.3.4 Índice de forma y textura. 35
6.1.1.3.5 Análisis granulométrico. 37
6.1.1.3.6 Clasificación. 41
6.1.2 Cemento asfáltico. 43
6.1.2.1 Especificaciones INVIAS. 45
6.1.2.2 Cemento asfáltico utilizado. 46
6.1.2.3 Ensayos realizados. 46
6.1.2.3.1 Separación del cemento asfáltico en cuatro fracciones – SARA. 47
6.1.2.3.2 Curva reológica del cemento asfáltico. 51
6.1.2.3.3 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de corte dinámico – DSR. 54
6.1.2.3.4 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de viga a flexión – BBR. 57
6.1.2.3.5 Ensayos Convencionales. 59
6.2 PROCESO POR VÍA SECA 65
6.2.1 Agregados. 65
6.2.2 Granulometría del Caucho. 69
6.2.3 Cantidad óptima de Cemento Asfáltico. 71
6.2.4 Cantidad óptima de GCR. 71
6.2.5 Metodología. 72
6.2.6 Ensayos realizados a las mezclas asfálticas convencionales y mejoradas con GCR. 72
6.2.6.1 Diseño Marshall. 73

6.2.6.1.1 Vacíos con aire en la mezcla total. 75
6.2.6.1.2 Estabilidad. 77
6.2.6.1.3 Flujo. 79
6.2.6.1.4 Peso Unitario. 81
6.2.6.1.5 Vacíos en los agregados minerales. 83
6.2.6.1.6 Diseño óptimo. 85
6.2.6.2 Módulo dinámico. 86
6.2.6.3 Deformación permanente. 100
6.2.6.4 Resistencia a la fatiga. 108
6.3 PROCESO POR VÍA HÚMEDA 112
6.3.1 Granulometría de los agregados. 112
6.3.2 Granulometría del Caucho. 113
6.3.3 Cantidad óptima de caucho para modificar el ligante. 115
6.3.4 Cantidad óptima de ligante modificado con GCR. 115
6.3.5 Metodología. 116
6.3.6 Ensayos realizados al ligante. 119
6.3.6.1 Viscosidad Brookfield. 119
6.3.6.2 Ligantes modificados con GCR seleccionados. 132
6.3.6.3 Curva reológica del ligante modificado con GCR. 133
6.3.6.4 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de corte dinámico – DSR. 137
6.3.6.5 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de viga a flexión – BBR. 139
6.3.6.6 Ensayos Convencionales a los ligantes modificados con GCR. 140
6.3.7 Determinación del grado PG. 141
6.3.8 Ligante modificado con GCR escogido. 144
6.3.8.1 Análisis de segregación en la mezcla asfalto-caucho mediante la prueba de zenke. 144
6.3.9 Ensayos realizados a las mezclas asfálticas elaboradas con ligante modificado con GCR. 145
6.3.9.1 Contenido de vacíos con aire. 145
6.3.9.2 Módulos Dinámicos. 146
6.3.9.3 Diseño óptimo de la mezcla asfáltica con asfalto-caucho. 152
6.3.9.4 Deformación permanente. 155

6.3.9.5 Resistencia a la fatiga. 156
7 EJECUCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA EN EL CARRUSEL DE FATIGA 159
7.1 CARRUSEL DE FATIGA 159
7.2 TRAMOS DE PRUEBA Y ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 161
7.2.1 Fabricación, colocación y compactación de la mezcla asfáltica. 163
7.3 OPERACIÓN DEL CARRUSEL DE FATIGA 167
7.4 SEGUIMIENTO Y AUSCULTACIÓN 168
7.4.1 Deformación permanente. 170
7.4.2 Deflexiones estáticas con Viga Benkelman. 175
7.4.3 Densidad de fisuración. 177
7.4.4 Control de temperatura. 181
8 ESTUDIO AMBIENTAL 182
8.1 EMISIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES 182
8.1.1 Descripción de las muestras analizadas. 182
8.1.2 Metodología de la prueba de migración. 183
8.1.2.1 Extracción de los compuestos orgánicos volátiles (COVs). 183
8.1.3 Análisis por cromatografía de gases/espectrometría de masas. 184
8.1.4 Interpretación de los resultados. 185
8.2 EMISIÓN DE RUIDO 189
8.3 UTILIZACIÓN DEL GCR PARA SU USO EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS. 191
9 EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL 192
9.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO 192
9.2 CALCULO DE LA VIDA ÚTIL 194
10 CÁLCULO DE COSTOS UNITARIOS 200
11 RELACIÓN BENÉFICO-COSTO 203
12 ESPECIFICACIONES 205
13 CONCLUSIONES 206
13.1 GENERALES 206
13.2 ESPECÍFICAS 207
13.2.1 Respecto al cemento asfáltico modificado con caucho. 207
13.2.2 Respecto a las mezclas asfálticas mejoradas con caucho. 208

13.2.3 Respecto a las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con caucho. 210

14 RECOMENDACIONES 211

15 BIBLIOGRAFÍA 213

ANEXOS 217

LISTA DE CUADROS

Pág.

Cuadro 5.1. Terminología asociada con el uso del GCR en mezclas asfálticas. 13

Cuadro 6.1. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos y mezclas bituminosas. 31

Cuadro 6.1. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 1. 33

Cuadro 6.2. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 2. 33

Cuadro 6.3. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 3. 33

Cuadro 6.4. Resistencia al desgaste de agregados. 34

Cuadro 6.5. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 1. 34

Cuadro 6.6. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 2. 35

Cuadro 6.7. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 3. 35

Cuadro 6.8. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 1. 36

Cuadro 6.9. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 2. 36

Cuadro 6.10. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Arena. 37

Cuadro 6.11. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Gravilla. 37

Cuadro 6.12. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Grava. 37

Cuadro 6.13. Granulometría agregado pétreo, cantera No. 1 38

Cuadro 6.14. Clasificación del agregado pétreo, cantera 1. 42

Cuadro 6.15. Clasificación del agregado pétreo, cantera 2. 42

Cuadro 6.16. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Arenas. 42

Cuadro 6.17. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Gravilla. 43

Cuadro 6.18. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Grava. 43

Cuadro 6.19. Propiedades del cemento asfáltico de Barrancabermeja. 44

Cuadro 6.20. Propiedades del cemento asfáltico de Cartagena y Apiay. 44

Cuadro 6.21. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente. 45

Cuadro 6.22. Especificaciones del cemento asfáltico. 45

Cuadro 6.23. Resultados del ensayo de Cromatografía líquida en columna -SARA- para el ligante sin modificar. 50

Cuadro 6.24. Resultados de viscosidad Brookfield para el cemento asfáltico de Apiay. 52

Cuadro 6.25. Resultados de viscosidad Brookfield para el cemento asfáltico de Barrancabermeja. 52

Cuadro 6.26. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja originales. 57

Cuadro 6.27. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del RTFO. 57

Cuadro 6.28. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del PAV. 57

Cuadro 6.29. Resultados de caracterización viscoelástica en el BBR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del PAV. 59

Cuadro 6.30. Resultados de ensayos convencionales a cemento asfáltico no modificado. 60

Cuadro 6.31. Granulometría de Agregados para Mezcla Densa en Caliente establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96. 65

Cuadro 6.32. Granulometría del Caucho suministrada por la firma Renovadora de Llantas Ltda. 70

Cuadro 6.33. Granulometría del Caucho propuesta. 70

Cuadro 6.34. Criterios para diseños de mezclas asfálticas en caliente según las especificaciones del INVIAS 73

Cuadro 6.35. Diseño Marshall MDC-1 0%. 74

Cuadro 6.36. Diseño Marshall MDC-1 1%. 74

Cuadro 6.37. Diseño Marshall MDC-1 2%. 74

Cuadro 6.38. Diseño Marshall MDC-2 0%. 74

Cuadro 6.39. Diseño Marshall MDC-2 1%. 75

Cuadro 6.40. Diseño Marshall MDC-2 2%. 75

Cuadro 6.41. Resultados de Vacíos con aire en la mezcla total para los diseño MDC-1. 76

Cuadro 6.42. Resultados de Vacíos con aire en la mezcla total para los diseño MDC-2. 76

Cuadro 6.43. Resultados de Estabilidad Marshall para los diseño MDC-1. 78

Cuadro 6.44. Resultados de Estabilidad Marshall para los diseño MDC-2. 78

Cuadro 6.45. Resultados de Flujo Marshall para los diseño MDC-1. 80

Cuadro 6.46. Resultados de Flujo Marshall para los diseño MDC-2. 80

Cuadro 6.47. Resultados de Peso Unitario para los diseño MDC-1. 82

Cuadro 6.48. Resultados de Peso Unitario para los diseño MDC-2. 82

Cuadro 6.49. Resultados de los Vacíos en los agregados minerales para los diseño MDC-1. 84

Cuadro 6.50. Resultados de los Vacíos en los agregados minerales para los diseño MDC-2. 84

Cuadro 6.51. Resultados de los diseños Marshall. 86

Cuadro 6.52. Resultados Módulos Dinámicos diseños MDC-1. 89

Cuadro 6.53. Resultados Módulos Dinámicos diseños MDC-2. 90

Cuadro 6.54. Máxima velocidad de deformación en □m/min en el intervalo de 105 a 120 minutos. 101

Cuadro 6.55. categorías de tráfico pesado. 102

Cuadro 6.56. Resultados Deformación permanente diseños MDC-1. 103

Cuadro 6.57. Resultados Deformación permanente diseños MDC-2. 103

Cuadro 6.58. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños MDC-1. 108

Cuadro 6.59. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños MDC-2. 109

Cuadro 6.60. Granulometría de Agregados recomendada por el Departamento de Transporte de California para una granulometría discontinua. 113

Cuadro 6.61. Granulometría del Caucho recomendada por el Departamento de Transporte de California. 114

Cuadro 6.62. Granulometría del Caucho utilizada en la modificación del cemento asfáltico por el proceso húmedo. 115

Cuadro 6.63. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 10% de caucho a 155 y 165°C. 121

Cuadro 6.64. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 13% de caucho a 155 y 165°C. 121

Cuadro 6.65. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 15% de caucho a 155 y 165°C. 122

Cuadro 6.66. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 20% de caucho a 155 y 165°C. 122

Cuadro 6.67. Resultados de viscosidad Brookfield para Barrancabermeja con 15% de caucho a 155 y 165°C. 128

Cuadro 6.68. Resultados de viscosidad Brookfield para Barrancabermeja con 20% de caucho a 155 y 165°C. 128

Cuadro 6.69. Resultados de viscosidad Brookfield para el diseño A-13-165-55. 134

Cuadro 6.70. Resultados de viscosidad Brookfield para el diseño B-15-155-50. 134

Cuadro 6.71. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de A-13-165-55 y B-15-155-50 originales. 137

Cuadro 6.72. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de A-13-165-55 y B-15-155-50 después del RTFO. 137

Cuadro 6.73. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos A-13-165-55 y B-15-155-50 después del PAV. 138

Cuadro 6.74. Resultados de caracterización viscoelástica en el BBR para los cementos asfálticos A-13-165-55 y B-15-155-50 después del PAV. 140

Cuadro 6.75. Resultados de ensayos convencionales sobre cemento asfáltico modificado con GCR. 141

Cuadro 6.76. Grado de desempeño de los cementos asfálticos estudiados. 143

Cuadro 6.77. Resultados porcentaje de vacíos en la mezcla total para diferentes contenidos de asfalto-caucho en el diseño por el proceso húmedo. 146

Cuadro 6.78. Resultados Módulos Dinámicos para diferentes contenidos de asfalto-caucho en el diseño por el proceso húmedo. 146

Cuadro 6.79. Resultados Deformación permanente en el diseño McDonald. 155

Cuadro 6.80. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños McDonald. 157

Cuadro 7.1. Módulos elásticos de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento colocado en el Carrusel de Fatiga. 162

Cuadro 7.2. Deformaciones máximas obtenidas en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga. 171

Cuadro 7.3. Deflexiones máximas D0 obtenidas en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga. 175

Cuadro 7.4. Densidad de fisuración en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga. 179

Cuadro 9.1. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para los diseños MDC-1. 196

Cuadro 9.2. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para los diseños MDC-2. 197

Cuadro 9.3. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para el diseño McDonald. 198

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 6.1. Procedencia de agregados estudiados. 32

Tabla 8.1. Muestras analizadas 182

Tabla 8.2. Compuestos orgánicos identificados en las muestras analizadas 185

Tabla 8.3. Compuestos cuantificados en las muestras analizadas 188

Tabla 8.4. Niveles de ruido medidos en el Carrusel de Fatiga. 189

Tabla 9.1. Propiedades de los materiales granulares y de la subrasante. 192

Tabla 9.2. Propiedades de las mezclas asfálticas. 193

Tabla 9.3. Deformación relativa de tracción por flexión □t actuante en la base de la capa de rodadura 194

Tabla 9.4. Fractil de la ley normal centrada. 195

Tabla 9.5. Valores de los coeficientes y parámetros considerados. 195

Tabla 10.1. Resumen del análisis de precios unitarios del equipo mínimo necesario para la fabricación, colocación y compactación de las mezclas asfálticas. 201

Tabla 10.2. Resumen del análisis de precios unitarios para los materiales necesarios para la fabricación de las mezclas asfálticas. 201

Tabla 10.3. Resumen del análisis de precios unitarios para el transporte de la mezcla asfáltica a una distancia máxima de 30 km. 201

Tabla 10.4. Resumen del análisis de precios unitarios para la mano de obra necesaria para la fabricación, colocación y compactación de las mezclas asfálticas. 202

Tabla 10.5. Resumen de los costos directos, indirectos y totales de las mezclas asfálticas. 202

Tabla 11.1. Cálculo de Beneficio-costo para los diseños MDC-2, proceso seco. 203

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 5.1. Porcentaje en toneladas de la distribución del aprovechamiento de llantas usadas en la cadena de gestión. 12

Figura 5.2. Interacción entre las partículas de Caucho y el cemento asfáltico. 16

Figura 5.3. Esquema del proceso Ambiental para la molienda de llantas. 17

Figura 5.4. Esquema del proceso Criogénico para la molienda de llantas. 18

Figura 5.5. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía húmeda. 23

Figura 5.6. Partícula de caucho antes y después de ser mezclada con cemento asfáltico. 24

Figura 6.1. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 1. 39

Figura 6.2. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 2. 39

Figura 6.3. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Arenas. 40

Figura 6.4. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Gravillas. 40

Figura 6.5. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Gravas. 41

Figura 6.6. Variación de las fracciones del cemento asfáltico no modificado producto del envejecimiento. 50

Figura 6.7. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el cemento asfáltico de Apiay. 53

Figura 6.8. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el cemento asfáltico de Barrancabermeja. 53

Figura 6.9. Esquema del equipo DSR. 54

Figura 6.10. Esquema del funcionamiento del DSR. 55

Figura 6.11. Curva granulométrica de los Agregados escogida y los límites para una Mezcla Densa en Caliente tipo 1 establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96. 66

Figura 6.12. Curva granulométrica de los Agregados escogida y los límites para una Mezcla Densa en Caliente tipo 2 establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96. 67

Figura 6.13. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-1 con 1% de caucho. 67

Figura 6.14. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-1 con 2% de caucho. 68

Figura 6.15. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-2 con 1% de caucho. 68

Figura 6.16. Curva granulométrica de Agregados y caucho para el diseño MDC-2 con 2% de caucho. 69

Figura 6.17. Curva granulométrica del caucho tal como es suministrada por la firma Renovadora de Llantas Ltda. 70

Figura 6.18. Curva granulométrica del caucho utilizada para ser incorporada a las mezclas asfálticas por medio de la vía seca. 71

Figura 6.19. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1. 76

Figura 6.20. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2. 77

Figura 6.21. Variación de la Estabilidad Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1. 78

Figura 6.22. Variación de la Estabilidad Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2. 79

Figura 6.23. Variación del Flujo Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1. 80

Figura 6.24. Variación del Flujo Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2. 81

Figura 6.25. Variación del Peso Unitario respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1. 82

Figura 6.26. Variación del Peso Unitario respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2. 83

Figura 6.27. Variación del Porcentaje de Vacíos en los agregados minerales respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1. 84

Figura 6.28. Variación del Porcentaje de Vacíos en los agregados minerales respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2. 85

Figura 6.29. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños MDC-1. 90

Figura 6.30. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños MDC-1. 91

Figura 6.31. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños MDC-1. 91

Figura 6.32. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños MDC-2. 92

Figura 6.33. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños MDC-2. 92

Figura 6.34. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños MDC-2. 93

Figura 6.35. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños MDC-1. 93

Figura 6.36. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños MDC-1. 94

Figura 6.37. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños MDC-1. 94

Figura 6.38. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños MDC-1. 95

Figura 6.39. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños MDC-2. 95

Figura 6.40. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños MDC-2. 96

Figura 6.41. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños MDC-2. 96

Figura 6.42. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños MDC-2. 97

Figura 6.43. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 5°C, en los diseños MDC-1. 97

Figura 6.44. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 25°C, en los diseños MDC-1. 98

Figura 6.45. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 40°C, en los diseños MDC-1. 98

Figura 6.46. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 5°C, en los diseños MDC-2. 99

Figura 6.47. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 25°C, en los diseños MDC-2. 99

Figura 6.48. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 40°C, en los diseños MDC-2. 100

Figura 6.49. Progreso de la deformación permanente, en los diseños MDC-1. 103

Figura 6.50. Progreso de la deformación permanente, en los diseños MDC-2. 104

Figura 6.51. Curva de Fatiga de los diseños MDC-1. 109

Figura 6.52. Curva de Fatiga de los diseños MDC-2. 110

Figura 6.53. Curva granulométrica de los agregados recomendada por CALTRANS para una granulometría discontinua, para mezclas asfálticas elaboradas por la vía húmeda. 113

Figura 6.54. Curva granulométrica del caucho utilizada para ser incorporada a las mezclas asfálticas por medio de la vía húmeda. 114

Figura 6.55. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-10. 121

Figura 6.56. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-13. 122

Figura 6.57. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-15. 123

Figura 6.58. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-20. 123

Figura 6.59. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño B-15. 129

Figura 6.60. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño B-20. 129

Figura 6.61. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el diseño A-13-165-55. 134

Figura 6.62. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el diseño B-15-155-50. 135

Figura 6.63. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para los ligantes originales de Apiay sin modificar y modificado. 136

Figura 6.64. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para los ligantes originales de Barrancabermeja sin modificar y modificado. 136

Figura 6.65 Variación de las propiedades reológicas al modificar los ligantes de Apiay y Barrancabermeja con GCR. Ligantes en estado original. 138

Figura 6.66 Variación de las propiedades reológicas al modificar los ligantes de Apiay y Barrancabermeja con GCR. Ligantes después del RTFO. 138

Figura 6.67 Cambios de los ligantes Apiay y A-13-165-55 al ser sometidos al RTFO. 139

Figura 6.68 Cambios de los ligantes Barrancabermeja y B-15-155-50 al ser sometidos al RTFO. 139

Figura 6.69 Gráficos que muestran la segregación del ligante B-15-155-50 en estado original, mediante el análisis del módulo complejo y el ángulo de fase del ligante modificado sometido a la prueba de Zenke. 144

Figura 6.70. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 5°C, en los diseños McDonald. 147

Figura 6.71. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 25°C, en los diseños McDonald. 148

Figura 6.72. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 40°C, en los diseños McDonald. 148

Figura 6.73. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños McDonald. 149

Figura 6.74. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños McDonald. 149

Figura 6.75. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños McDonald. 150

Figura 6.76. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños McDonald. 150

Figura 6.77. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños McDonald. 151

Figura 6.78. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños McDonald. 151

Figura 6.79. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños McDonald. 152

Figura 6.80. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald. 153

Figura 6.81. Variación del Módulo Dinámico a 25°C respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald. 153

Figura 6.82. Variación del Peso unitario respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald. 154

Figura 6.83. Variación del Peso específico máximo respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald. 154

Figura 6.84. Progreso de la deformación permanente, en los diseños McDonald y Barrancabermeja. 155

Figura 6.85. Curva de Fatiga de los diseños McDonald. 157

Figura 7.1. Esquema de la estructura del pavimento colocado en el Carrusel de Fatiga. 161

Figura 7.2. Distribución de la frecuencia de circulación del Carrusel de Fatiga. 167

Figura 7.3. Esquema de los ejes por los cuales circula el Carrusel de Fatiga. 167

Figura 7.4. Esquema de los ejes por en el Carrusel de Fatiga. 168

Figura 7.5. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 1, diseño MDC-2 sin caucho. 171

Figura 7.6. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 2, diseño MDC-2 sin caucho. 172

Figura 7.7. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 3, diseño MDC-2 sin caucho. 172

Figura 7.8. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 4, diseño MDC-2 con caucho. 173

Figura 7.9. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 5, diseño MDC-2 con caucho. 173

Figura 7.10. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 6, diseño MDC-2 con caucho. 174

Figura 7.11. Comparación de la variación del radio de curvatura calculado respecto al número de ejes, para las dos estructuras. 176

Figura 7.12. Comparación de la variación de la deflexión D0 medida respecto al número de ejes, para las dos estructuras. 176

Figura 7.13. Comparación del factor RcxD0 calculado respecto al número de ejes, para las dos estructuras. 177

Figura 8.1 Montaje en SPME para muestreo Head-space 183

Figura 8.2. Sumatoria de áreas en muestras analizadas. 187

Figura 8.3. Comparación concentración total de compuestos cuantificados. 188

Figura 8.4. Lectura de niveles de ruido. 189

Figura 8.5. Niveles de ruido en el pavimento, niveles altos. 190

Figura 8.6. Niveles de ruido en el pavimento, niveles bajos. 190

Figura 9.1. Estructura supuesta para el cálculo de la vida útil. 193

Figura 9.2. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños MDC-1. 196

Figura 9.3. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños MDC-2. 197

Figura 9.4. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños McDonald. 198

Figura 11.1. Valor de los costos directos por número de ejes equivalentes para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho. 204

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Pág.

Fotografía 4.1. Pavimento asfáltico modificado con caucho realizado en la ciudad de Ventura, Estado de California EE.UU.. 5

Fotografía 5.1. Aspecto de un botadero de llantas desechadas. 9

Fotografía 5.2. Aplicación de asfalto-caucho en un tratamiento superficial. 27

Fotografía 6.1. Ensayo SARA en cromatografía líquida de columna. 51

Fotografía 6.2. Ensayo de DSR, disco de 25 mm. 56

Fotografía 6.3. Reómetro de viga a flexión BBR. 58

Fotografía 6.4. Ensayo de Ductilidad. 61

Fotografía 6.5. Ensayo de Densidad en cementos asfálticos. 61

Fotografía 6.6. Ensayo de Penetración en cementos asfálticos. 62

Fotografía 6.7. Ensayo de Punto de ablandamiento con anillo y bola al cemento asfáltico. 62

Fotografía 6.8. Ensayo de película delgada en horno rotatorio RTFO. 63

Fotografía 6.9. Botellas con cemento asfáltico después del ensayo de película delgada en horno rotatorio RTFO. 63

Fotografía 6.10. Cámara de envejecimiento a presión PAV. 64

Fotografía 6.11. Bandejas con cemento asfáltico después del ensayo de envejecimiento en la cámara a presión PAV. 64

Fotografía 6.12. Ensayo Estabilidad y Flujo Marshall. 75

Fotografía 6.13. Evaluación de Módulos Dinámicos de mezclas asfálticas en la MTS. 87

Fotografía 6.14. Probetas de concreto asfáltico compactadas en la PCG para evaluar Módulos Dinámicos. 89

Fotografía 6.15. Equipo para medir la deformación permanente en mezclas asfálticas, mediante el ensayo WTT. 101

Fotografía 6.16. Medición de la deformación permanente de una mezcla asfáltica MDC-2 con 1% de caucho. 102

Fotografía 6.17. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 0% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. 105

Fotografía 6.18. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 1% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. _____ 105

Fotografía 6.19. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 2% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. _____ 106

Fotografía 6.20. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 0% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. _____ 106

Fotografía 6.21. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 1% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. _____ 107

Fotografía 6.22. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 2% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT. _____ 107

Fotografía 6.23. Probetas para el ensayo de resistencia a la fatiga. _____ 111

Fotografía 6.24. Equipo para el ensayo de resistencia a la fatiga._____ 111

Fotografía 6.25. Aspecto de la mezcla asfalto caucho en el proceso de mezclado; corresponde a un cemento asfáltico de Apiay con 10% de caucho a 155°C. _____ 116

Fotografía 6.26. Control de la temperatura en el proceso de mezclado del cemento asfáltico con el caucho. _____ 117

Fotografía 6.27. Equipo de mezclado del cemento con GCR. _____ 118

Fotografía 6.28. Muestras de cemento asfáltico de Apiay con 10% de caucho después del proceso de mezclado, cada una corresponde a un tiempo de reacción diferente. _____ 118

Fotografía 6.29. Viscosímetro Rotacional Brookfield Modelo RVTDV - II. _____ 120

Fotografía 6.30. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 10% de Caucho a 155°C. 124

Fotografía 6.31. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 10% de Caucho a 165°C. 125

Fotografía 6.32. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 155°C. 125

Fotografía 6.33. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 165°C. 126

Fotografía 6.34. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 15% de Caucho a 155°C. 126

Fotografía 6.35. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 15% de Caucho a 165°C. 127

Fotografía 6.36. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 20% de Caucho a 155°C. 127

Fotografía 6.37. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 20% de Caucho a 165°C. 128

Fotografía 6.38. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 155°C. _____ 130

Fotografía 6.39. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 165°C. _____ 130

Fotografía 6.40. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 20% de Caucho a 155°C. _____ 131

Fotografía 6.41. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 20% de Caucho a 165°C. 131

Fotografía 6.42. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 165°C con un tiempo de reacción de 55 min., diseño A-13-165-55. 132

Fotografía 6.43. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 155°C con un tiempo de reacción de 50 min., diseño B-15-155-50. 133

Fotografía 6.44. Ensayo de Ahuellamiento en una probeta McDonald con 7% de ligante B-15-155-50. 156

Fotografía 7.1. Carrusel de Fatiga de la Universidad de Los Andes. 160

Fotografía 7.2. Colocación y compactación material granular. 162

Fotografía 7.3. Control de compactación del material granular mediante densímetro nuclear. 163

Fotografía 7.4. Grano de Caucho Reciclado y finos de trituración. 164

Fotografía 7.5. Premezclado del GCR y los finos de trituración. 165

Fotografía 7.6. Colocación de la mezcla asfáltica. 166

Fotografía 7.7. Compactación. 166

Fotografía 7.8. Control de temperatura del pavimento. 169

Fotografía 7.9. Control de la deformación permanente. 169

Fotografía 7.10. Medición de deflexiones estáticas. 170

Fotografía 7.11. Ahuellamiento en el tramo con MDC-2 sin caucho, después de 210.000 repeticiones de carga. 174

Fotografía 7.12. Presencia de finos sobre la carpeta de rodadura provenientes de la capa granular. 178

Fotografía 7.13. Presencia de finos sobre la carpeta de rodadura provenientes de la capa granular. 178

Fotografía 7.14. Fisuración en el tramo con MDC-2 sin caucho, después de 210.000 repeticiones de carga. 180

Fotografía 7.15. Fisuración en el tramo con MDC-2 con caucho, después de 210.000 repeticiones de carga. 180

Fotografía 8.1. Exposición de la fibra de SPME en el puerto de inyección del Cromatógrafo de gases con detector selectivo de masas. 184

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DEFINICIONES

ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACION DE LA MEZCLAS ASFALTICAS MEJORADAS CON GCR POR EL PROCESO SECO EN LABORATORIO

ANEXO C. ANEXO FOTOGRÁFICO CARRUSEL DE FATIGA

ANEXO D. CROMATOGRAMAS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

ANEXO E. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EN Depav DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO ESTUDIADAS

ANEXO F. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO

ANEXO G. ESPECIFICACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL GCR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

1 RESUMEN

El Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, contrató a la Universidad de Los Andes para adelantar el *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 bituminosas que se colocan en la ciudad de Bogotá.

Actualmente existen dos procesos usados en la elaboración de concreto asfáltico en los que se incorpora desecho de llantas usadas, denominados como proceso húmedo y proceso seco. Estudios previos realizados con caucho natural y sintético en algunos países como Estados Unidos, España, Sudáfrica, entre otros, demostraron que el caucho sintético es el más apropiado para este uso particular, el cual es obtenido de forma económicamente viable empleando llantas desechadas que deben ser molidas hasta obtener tamaños de partícula apropiados, este caucho molido recibe el nombre de grano de caucho reciclado ó GCR.

En consecuencia, el presente estudio tiene como objetivo principal establecer de manera confiable la metodología a seguir para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de las mezclas asfálticas con caucho producto del desecho de llantas usadas, contribuyendo además con la solución del problema ambiental que estas generan al finalizar su vida útil por ser un residuo difícil de eliminar.

El presente estudio abarca desde la caracterización de los materiales involucrados, el diseño y estudio de las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, la evaluación de las mejoras en la vida útil del pavimento, estimación de la mitigación del impacto ambiental, cálculo de la relación beneficio-costo, y elaboración de especificaciones técnicas.

2 ANTECEDENTES

Este trabajo de investigación se desarrolló como parte del *Proyecto de Transporte Urbano para Santa Fe de Bogotá*, en donde el Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, invitó a la Universidad de Los Andes para que participara por medio de licitación pública en la ejecución del *Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas,* cuya interventoría estuvo a cargo por la Dirección Técnica de Malla Vial del IDU.

Este proyecto está basado en un estudio previo del Distrito Capital sobre el aspecto ambiental de los desechos sólidos, donde el manejo de las llantas usadas generadas por el parque automotor de Santa Fe de Bogotá recibió especial atención. Una de las conclusiones del estudio en mención es el despiece y trituración de llantas usadas y su incorporación en las mezclas asfálticas.

3 METODOLOGÍA

Inicialmente se realizó una búsqueda exhaustiva de información relacionada con métodos modernos para el diseño y construcción de vías haciendo uso de asfaltos modificados, considerando especialmente la alternativa de utilización de mezclas asfálticas mejoradas con caucho. Igualmente se recopiló información existente relacionada con nuevas tecnologías orientadas al proceso del caucho proveniente de llantas usadas y sus aplicaciones en las mezclas asfálticas. Mucha de esta información se obtuvo de asociaciones internacionales como Rubber Pavement Association, International Society for Asphalt Pavements, e información contenida en las memorias del Congreso Internacional Asphalt Rubber 2000 realizado en Vilamoura, Portugal, en Noviembre del año 2000, entre otros documentos.

En el proceso de mejoramiento del cemento asfáltico se estudiaron las condiciones de incorporación por vía húmeda del GCR a dos cementos asfálticos nacionales. Mediante este proceso se pretende modificar el ligante para fabricar posteriormente mezclas asfálticas en caliente. Para el proceso de mejoramiento de las mezclas asfálticas por vía seca se estudió la incorporación del GCR como un agregado fino manteniendo los husos granulométricos convencionales. Estas mezclas asfálticas se analizaron bajo una perspectiva mecánica y volumétrica.

Seguido al proceso de recopilación de información se continuó con la etapa de laboratorio en la cual se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, y el efecto en la vida útil que esta aporta al pavimento. Posteriormente con base en las mejores condiciones logradas se decidió probar a escala real los resultados obtenidos en laboratorio mediante el empleo del carrusel de fatiga.

Como resultado de todo el proceso se elaboraron las especificaciones técnicas generales para el empleo del GCR en la elaboración de mezclas asfálticas.

4 INTRODUCCIÓN

Tres de los problemas más comunes que se presentan en los pavimentos asfálticos son el fisuramiento por fatiga, el ahuellamiento, y los que corresponden a la adherencia agregado-ligante, situación que disminuye la vida útil del pavimento e incrementa los costos de mantenimiento y operación vehicular.

Como respuesta a la necesidad de incrementar la competitividad de los pavimentos, y tratando de minimizar los factores que inciden en él, es necesario mejorar las características del cemento asfáltico mediante la utilización racional y técnica de modificadores. Este procedimiento representa un cambio en la filosofía tradicional de diseñar mezclas asfálticas que se ajusten al ligante, ya que por el contrario se diseña un ligante bituminoso para que satisfaga una necesidad y que representa una solución a un problema específico. Esta modificación podrá incluir mejoras en una disminución en la susceptibilidad térmica del ligante por la incorporación de grupos polares más estables, los cuales lo protegen de la oxidación y mejoran el comportamiento de la mezcla asfáltica ante la acción del agua, asunto este que además depende de las características del material pétreo.

Este trabajo de investigación se enfoca en el empleo del GCR como modificador del ligante y como mejorador de la mezcla asfáltica para su uso en la construcción de pavimentos flexibles y semirígidos. Los beneficios que éste aporta a los pavimentos, y a los cuales se espera llegar con esta investigación, podrán verse reflejados en una disminución de espesores en las capas asfálticas con respecto a pavimentos asfálticos con materiales convencionales para una misma vida útil establecida. Esto se debe a que el caucho bien dosificado en las mezclas asfálticas mejora la resistencia al fisuramiento por fatiga y evita el ahuellamiento del pavimento a altas temperaturas, aumentando la vida útil del mismo y disminuyendo los costos de mantenimiento. Por otro lado mejora el agarre de los neumáticos de los vehículos al pavimento, reduce el envejecimiento por oxidación del

ligante, ayuda a la preservación del medio ambiente, y a disminuir el ruido generado por el tráfico al contacto con el pavimento.

Entre las desventajas se encuentran, para la vía húmeda, un mayor costo inicial por las modificaciones necesarias a los equipos o plantas asfálticas y un aumento en la temperatura de mezclado, y para la vía seca un mayor tiempo de compactación en obra. Además existen otras desventajas como la falta de especificaciones y los problemas potenciales para reciclar estos productos, asunto que debe ser objeto de un programa de investigación.

Fotografía 4.1. Pavimento asfáltico modificado con caucho realizado en la ciudad de Ventura, Estado de California EE.UU.. Tomado de Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference.

En general se espera que los ligantes y las mezclas asfálticas mejoradas con caucho superen en desempeño a los productos convencionales. Sin embargo, un registro de su comportamiento mediante ensayos de laboratorio es limitado para justificar plenamente esta tendencia. Por esta razón es necesario extender su estudio al trabajo de campo para

determinar con mayor precisión el beneficio que aporta la incorporación del GCR, y poder establecer las respectivas especificaciones de diseño.

El costo inicial de la mezcla asfáltica mejorada con caucho resulta ser más alto que el de una mezcla asfáltica convencional; para recuperar esta inversión la vida útil del pavimento mejorado con caucho se debe incrementar en relación a la de un pavimento con materiales convencionales. Se ha encontrado que el proceso seco es mucho más económico que el húmedo por no requerir modificaciones en la planta de mezclado. Actualmente el costo en la elaboración de mezclas asfálticas mejoradas con caucho mediante el proceso seco es mínimo entre todas las tecnologías disponibles; adicional a esto, presenta la ventaja de que su proceso de mezclado es muy similar al convencional. Por lo tanto, este sistema parece tener la mejor perspectiva para aplicaciones comerciales a nivel nacional. Así, para aumentar el nivel de certeza, se debe seguir investigando y dar a conocer el amplio uso que el GCR tiene en la mejora de mezclas asfálticas y en la modificación de ligantes que proporcionan ventajas económicas y técnicas.

5 MARCO TEÓRICO

5.1 ASPECTOS GENERALES

Ingenieros de vías alrededor del mundo han experimentado incorporando GCR en pavimentos asfálticos desde la década de los cincuenta. Algunos de estos primeros experimentos involucraron la adición de caucho natural con el objetivo de aprovechar su flexibilidad en una superficie de pavimento eficiente y duradera. La labor fue difícil arrojando resultados iniciales que proporcionaban pequeños o nulos beneficios; el resultado fue un pavimento asfáltico modificado con un mayor costo y una vida de servicio más corta que la de uno convencional. Sólo hasta la década de los sesenta se encontró una formulación que resultó ser satisfactoria.

En países de los cinco continentes el empleo de GCR ha dado buenos resultados, y su uso se ha venido incrementando con el tiempo gracias al apoyo e interés de entidades públicas y centros de investigación.

5.1.1 Características fisicoquímicas de las llantas. Las principales materias primas utilizadas en la fabricación de llantas son cauchos naturales y sintéticos (SBS, SBR), acero, textiles y aditivos, entre los que se destacan el negro de humo, aceites, óxido de zinc activado con cadmio, dióxido de titanio, sulfuro, sílica, resinas fenólicas y ácidos grasos.

La materia base del caucho natural es el látex que se da en la Hevea mas conocido como árbol del caucho. Las cualidades que el caucho natural aporta a las llantas son: la maleabilidad, gran resistencia mecánica y adherencia de estas sobre cualquier tipo de

superficie, cualidades que hacen que todavía hoy siga siendo un elemento indispensable para la industria de las mismas, donde se consume aproximadamente el 70% de la producción mundial. En el ligante modificado con GCR el aporte del látex de las llantas se traduce en un mejor comportamiento elástico.

El caucho sintético fue desarrollado durante la segunda guerra mundial a través del programa americano GRS (Government Rubber Stock) para contrarrestar la falta del caucho natural, los cauchos sintéticos ofrecen cada día mayores posibilidades de formulación. Estos elastómeros derivados del petróleo han permitido mejorar las características de las llantas, en particular prolongar su vida útil y aumentar su nivel de adherencia. Cuando se incorporan en los ligantes asfálticos mejoran la susceptibilidad térmica y en general sus características reológicas proporcionando un cemento asfáltico no tan fluido a elevadas temperaturas ni tan viscoso a bajas.

El negro de humo es obtenido por combustión o descomposición térmica parcial de gases naturales o hidrocarburos pesados. Este elemento en las llantas permite conseguir unas mezclas más resistentes a la rotura y a la abrasión, dándoles el característico color negro. En el ligante actúa como un agente inhibidor del envejecimiento, lo que prolonga la capacidad cohesiva del mismo en el tiempo.

La sílice es obtenida de la arena que al ser asociada con un elastómero sintético específico, gracias a un agente de enlace y a un proceso especial de mezclado, da como resultado mezclas que permiten elaborar unas llantas que presentan baja resistencia al rodamiento y buena adherencia en superficies frías, sin perder los niveles de resistencia al desgaste del negro de humo.

Dentro de los procesos de fabricación de llantas se encuentra el vulcanizado, el cual consiste en ligar las cadenas de elastómeros entre sí por reacción con el azufre bajo la acción del calor. Durante este proceso la mezcla de elastómeros pasa de un estado plástico a uno elástico.

5.1.2 Las llantas desechadas. Cada año millones de llantas son desechadas en todo el mundo. Las llantas viejas son visualmente contaminantes, atentan contra la salud pública y generan peligro por ser generadoras de incendios; por otro lado se presenta inconvenientes con su disposición final, ya que por ser considerada un desecho sólido deben ser enterradas, almacenadas, o destruidas por incineración.

Fotografía 5.1. Aspecto de un botadero de llantas desechadas. Tomado de: http://www.ces.clemson.edu/arts/.

La quema directa provoca graves problemas medioambientales ya que produce emisión de gases que contienen partículas nocivas para el entorno. El almacenamiento ocupa un espacio considerable causando pérdida de recursos y desperdicio de energía. En los rellenos sanitarios imposibilitan la compactación y ocasionan problemas de estabilidad por la degradación química parcial que sufren, generando inseguridad en los mismos. En las montañas de llantas la proliferan roedores, insectos y otros animales dañinos, y la reproducción de mosquitos, que transmiten por picadura fiebres y encefalitis, llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza.

En la actualidad se utilizan diversos métodos para recuperar algunos de los materiales presentes en las llantas desechadas, y para destruir sus componentes peligrosos, estos son algunos:

Termólisis: se trata de un sistema en el que se somete a los materiales de residuos de llantas a un calentamiento en un medio en el que no existe oxígeno. Las altas temperaturas y la ausencia de oxígeno tienen como efecto destruir los enlaces químicos.

Pirolisis: este proceso, que se encuentra aún en fase de investigación, presenta problemas técnicos en la separación de la gran cantidad de compuestos carbonados que se producen en su desarrollo, resultando muy costoso.

Incineración: proceso mediante el cual se produce la combustión de los materiales orgánicos de las llantas a altas temperaturas en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Es un proceso costoso que presenta inconvenientes en las diferentes velocidades de combustión de los componentes y la necesidad de depuración de los residuos, por lo que es difícil de controlar, resultando contaminante. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son perjudiciales para la salud humana, entre ellos el monóxido de carbono, hollín de xileno, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, dióxido de azufre, óxidos de plomo, tolueno, entre otros. El hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos altamente cancerígenos. El zinc es particularmente tóxico para la fauna acuática. Muchos de estos compuestos son solubles en el agua, por lo que pueden pasar a la cadena trofica y de ahí a los seres humanos.

Trituración criogénica: este método requiere instalaciones muy complejas que lo hace poco rentable. De igual manera el mantenimiento de la maquinaria y del proceso resultan difíciles. La baja calidad de los productos obtenidos y la dificultad física y económica para filtrar y separar el caucho del metal y los textiles que forman la llanta provoca que este sistema sea poco recomendable.

Trituración mecánica: por ser un proceso puramente mecánico los productos resultantes son de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos generalmente es el paso previo en los diferentes métodos de recuperación y rentabilización de los residuos de llantas.

Según el DAMA[1], el mayor volumen de llantas usadas generadas por el parque automotor en Bogotá se utiliza para aprovechamiento energético, fundamentalmente como combustible en los hornos de producción de panela en el noroccidente de Cundinamarca. Un menor volumen se lleva a labores de reencauche, y una cantidad mínima es usada en actividades de regrabado, uso artesanal, entre otros. En la Figura 5.1 se ilustra la tendencia del uso de llantas desechadas en Bogotá, de acuerdo al estudio realizado por OCADE para el DAMA.

Este estudio concluye con cuatro alternativas ambientales que mejor se acomodan a nuestro medio para el uso de llantas desechadas, siendo de mayor viabilidad las dos últimas ya que las dos primeras generan emisión de compuestos orgánicos volátiles por la incineración de las mismas, estas alternativas son:

1. Aprovechamiento energético y materia prima para hornos en la industria cementera, como fundamento en el uso de llantas usadas como combustible alterno al carbón en función de su potencial calorífico.
2. Aprovechamiento energético en termoeléctricas, utilizando el poder calorífico de llantas usadas para generar energía eléctrica.
3. Su utilización como materia prima para la producción de pavimento asfáltico, con base en la adición de caucho pulverizado durante la fabricación del mismo.

[1] COLOMBIA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá. En Gestión de residuos en Bogotá. Bogotá D.C. : DAMA, 2000. p. 51-69

4. Suministro de materia prima para productos de caucho, entre los cuales están los moldeados, las alfombras, entre otros.

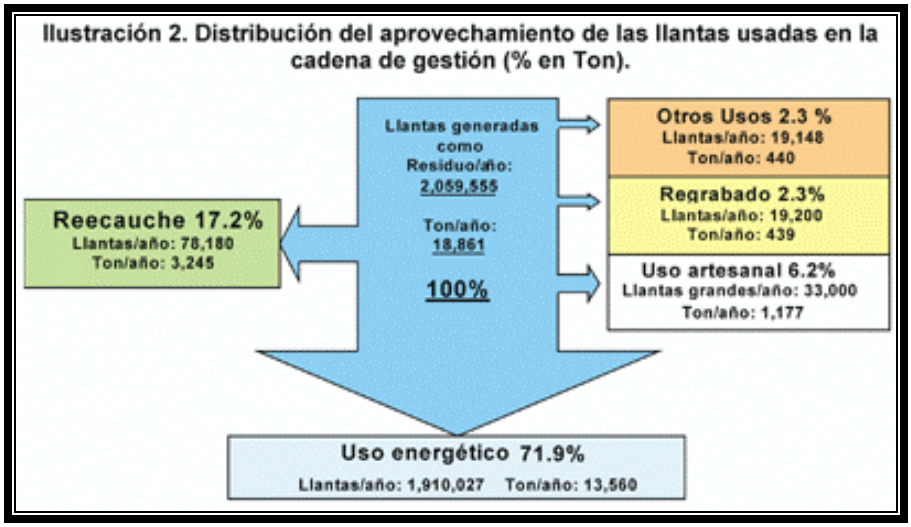


Figura 5.1. Porcentaje en toneladas de la distribución del aprovechamiento de llantas usadas en la cadena de gestión. Tomado de: Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá.

Con base en una priorización de las alternativas entre las cuales se consideraron los aspectos económicos, tecnológicos, sociales y ambientales, la Unión Temporal OCADE Ltda estableció la alternativa de suministro de materias primas como la mejor opción, dentro de la cual cabe la opción de su utilización en la construcción de pavimentos asfálticos.

5.1.3 Aplicación del GCR en los pavimentos. El caucho de llantas usadas puede ser incorporado en las mezclas asfálticas por medio de dos métodos diferentes denominados como proceso húmedo y proceso seco. En el proceso húmedo, el caucho actúa modificando el cemento asfáltico, mientras que en el proceso seco, el caucho es usado como una porción del agregado fino. Cada proceso es utilizado dependiendo del producto que se quiera obtener, existiendo para cada uno diferentes tecnologías, como se muestra a continuación.

Cuadro 5.1. Terminología asociada con el uso del GCR en mezclas asfálticas.

MATERIAL	PROCESO	TECNOLOGIA	PRODUCTO
GCR	Húmedo	Bachadas	Asfalto modificado con caucho ó Asfalto-caucho
		Continua	
		Terminal	
	Seco	PlusRide	Mezcla asfáltica mejoradas con caucho
		Genérica	
		Convencional	

El caucho para ser utilizado como materia prima en la elaboración de mezclas asfálticas es reciclado de las llantas desechadas y disminuido en tamaño por trituración mecánica. El GCR debe ser de contextura fina en tamaños menores a 6.3 mm (1/4"). Los métodos para la producción del GCR imparten diferentes características en cuanto a la forma y textura del grano de caucho. Las técnicas de molienda más comunes son el proceso ambiental y criogénico.

Una de las principales características que presenta el cemento asfáltico modificado con GCR es el aumento en la viscosidad de la mezcla resultante; esto hace que la mezcla asfalto-caucho sea más flexible a bajas temperaturas mientras que a altas temperaturas logra que sea menos plástica. Entre los principales beneficios logrados en los pavimentos se encuentran las mejoras en la deformación permanente, la fatiga, y la resistencia al fisuramiento a bajas temperaturas.

Países como Estados Unidos se dieron a la tarea de buscar una solución a la disposición final de las llantas desechadas. En este país algunos Estados han reglamentado el uso del GCR como material para mejorar los pavimentos asfálticos; es así como un determinado porcentaje de GCR se viene usando en las mezclas asfálticas colocadas desde 1994, iniciando ese año con un 5 por ciento y llegando hasta un 20 por ciento en 1997. California, Florida y Arizona lideraron esta campaña cuyo objetivo inicial se fundamentó en aspectos ambientales, pero que poco a poco al evaluar las propiedades y beneficios que se adquirían en los pavimentos con estudios de laboratorio y campo, se propusieron incentivar a los contratistas de vías mediante un mandato que otorgaba beneficios

económicos a aquellos que utilizaran el GCR en la elaboración de mezclas asfálticas, por el contrario, si no se cumplía con el mandato, eran penalizados con la pérdida del porcentaje equivalente a la ayuda federal. Este mandato se puso en marcha gracias a la información suministrada por el Ministerio de transporte estadounidense USDOT y la Agencia de protección del medio ambiente EPA en un informe al Congreso estadounidense en el que se indicaba la factibilidad del empleo de GCR en mezclas asfálticas.

Mezclas asfálticas y sellantes modificados con caucho fueron usados por primera vez en la República de Sudáfrica en 1983. En los últimos 15 años se han colocado más de 150.000 Ton de asfalto modificado con caucho en este país. Muchos estudios de campo y laboratorio se han adelantado en Sudáfrica haciendo uso de la experiencia adquirida por el estado de California en los Estados Unidos.

Dependiendo del proceso utilizado, el costo de usar GCR en las mezclas asfálticas puede llegar a superar al de las elaboradas con materiales convencionales. El proceso por vía seca demanda mas cantidad de ligante, requiere un procedimiento especial para la adición del GCR, y un mayor tiempo de compactación en obra. El proceso por vía húmeda requiere nuevos equipos en planta, como la unidad de mezclado y almacenamiento del asfalto-caucho, cambio de bombas y tuberías, y energía adicional para calentar la mezcla a mayores temperaturas con tiempos de reacción prolongados.

El caucho sintético se ha convertido en un recurso muy popular y económico en la elaboración de mezclas asfálticas gracias al creciente aumento de llantas desechadas en áreas metropolitanas. Algunas de las ventajas y desventajas en el uso del GCR sintético para mejorar mezclas asfálticas se presentan a continuación.

Entre las ventajas están:

1. El caucho molido al ser vulcanizado para resistir calor y sobrecalentamiento elimina los problemas encontrados con el polímero virgen.

2. No presenta solubilidad, a diferencia del caucho natural este no cambia dentro del cemento asfáltico al ser sobrecalentado.

3. Al ser mezclado con el cemento asfáltico a altas temperaturas atrae componentes livianos de este último hasta producir una partícula hinchada que se enlaza dentro de la matriz del ligante, generando un manto asfalto-caucho más resistente al fisuramiento.

4. El GCR posee valiosos componentes que pueden contribuir al buen desempeño del asfalto. Algunos de estos son:

   Negro de humo: este componente se destaca por su acción específica contra el desgaste de las llantas al contacto con la superficie, permitiendo quintuplicar la duración de la llanta. Considerado como un antioxidante, este componente reduce el desgaste de la llanta al incrementar la durabilidad del caucho. En la mezcla asfáltica ha demostrado aumentar las propiedades de refuerzo del ligante y ayudar a disminuir su envejecimiento.

   Antioxidantes: compuestos que retardan el deterioro del caucho natural causado por la oxidación. Algunas de las sustancias usadas son los estabilizadores del caucho sintético, principalmente de los polímeros de butadieno, en el momento de la preparación, y cuando se usan de este modo se denominan estabilizadores. el GCR contiene más del 20 por ciento de este compuesto.

   Aminas: son adicionadas durante el proceso de vulcanizado y están estrechamente relacionadas con los compuestos de antiadherencia. Las aminas aromáticas evitan el endurecimiento progresivo del caucho, el aumento de su fragilidad y la pérdida de la elasticidad.

   Aceites aromáticos: estos son similares a los agentes rejuvenecedores los cuales prolongan la vida del asfalto-caucho.

Las desventajas encontradas son:

1. La captación de aceites del cemento asfáltico por parte de las partículas de caucho afecta adversamente las propiedades de cohesividad y adhesividad del ligante, haciendo que disminuya la propiedad de la mezcla a unirse con las superficies de la estructura del pavimento o con los agregados. Este problema se puede solucionar usando de ligantes mas blandos ricos en aceites, sin embargo, la mezcla resultante podría ser muy blanda y delicada.

2. Al modificar el ligante con GCR la mezcla resultante experimenta un incremento en la viscosidad haciéndola no apta para ser usada en ciertas aplicaciones que requieren que este ligante sea bien fluido. Este problema se puede solucionar ablandando la mezcla asfalto-caucho con el uso de kerosén.

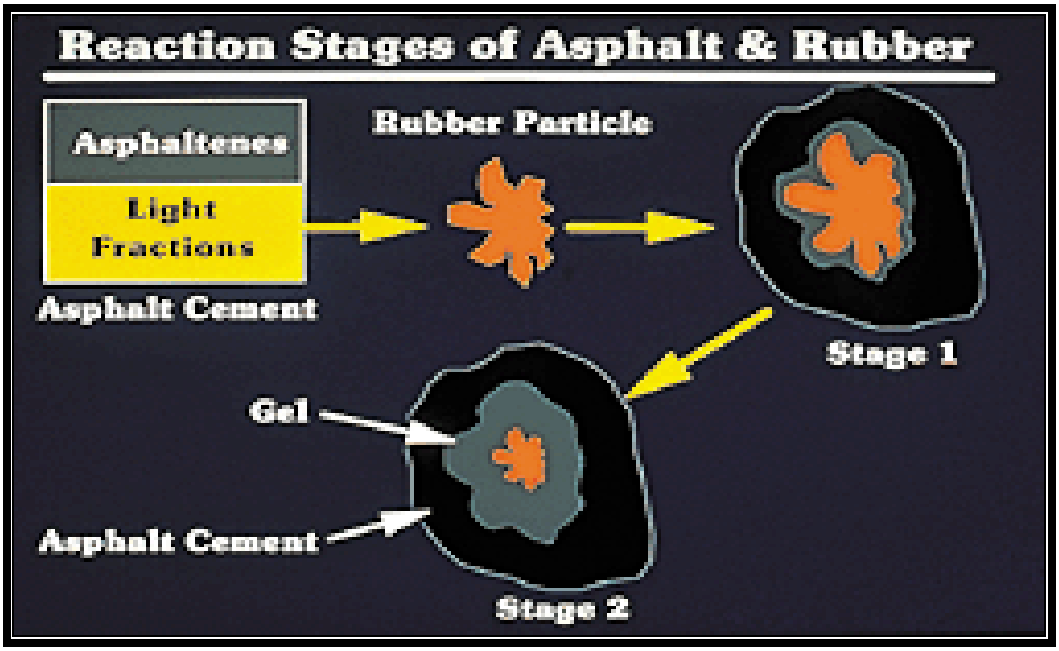


Figura 5.2. Interacción entre las partículas de Caucho y el cemento asfáltico. Tomado de: http://www.asphalt.com/emulsions/rubber.html.

5.1.3.1 Proceso ambiental. La molienda ambiental puede ser lograda de dos modos: por granulación y por molienda. El proceso ambiental describe la temperatura del caucho o del trozo de llanta para ser reducida de tamaño. Normalmente el material entra en el molino o granulador a temperatura ambiente aumentando considerablemente durante el proceso debido a la fricción generada al ser desgarrado. Los granuladores reducen el tamaño del caucho mediante corte por la acción de cuchillas. El tamaño de producto es controlado por tamices ubicados dentro de la máquina, los cuales pueden ser cambiadas para variar el tamaño de producto final.

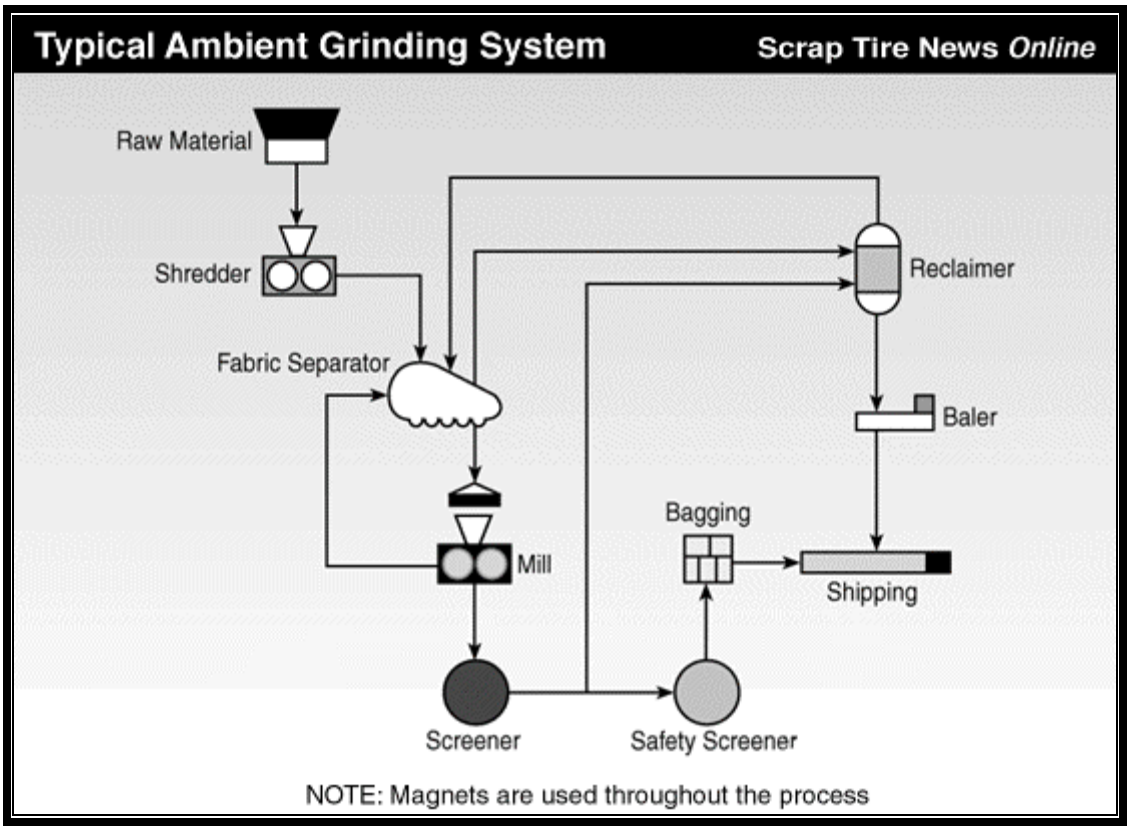


Figura 5.3. Esquema del proceso Ambiental para la molienda de llantas. Tomado de: http://www.scraptirenews.com/areas/crumb/process.html

Tanto los molinos primarios, secundarios y finales son muy similares, y su forma de operación tiene básicamente el mismo principio, estos usan dos rodillos grandes de giro con dentaduras que cortan el material, ubicadas en uno o ambos rodillos. La diferencia de los rodillos está en la configuración que se les da; estos funcionan cara a cara muy juntos y con

velocidades diferentes. El tamaño de producto es controlado por el espacio libre entre los rodillos. El caucho por lo general es pasado por 2 y 3 molinos para alcanzar varias reducciones del tamaño del grano, y así poder separarlo de los otros componentes como fibras y acero que se encuentran en las llantas. Las partículas de caucho producidas en molinos tienen formas típicas alargadas, angostas, y con una alta superficie de área.

5.1.3.2 Proceso criogénico. Este proceso se refiere al empleo de nitrógeno líquido u otros materiales ó métodos para congelar trozos de llanta o granos de caucho antes de la reducción de tamaño, haciéndolo quebradizo como un cristal a temperaturas por debajo de --80°F (-62ºC).

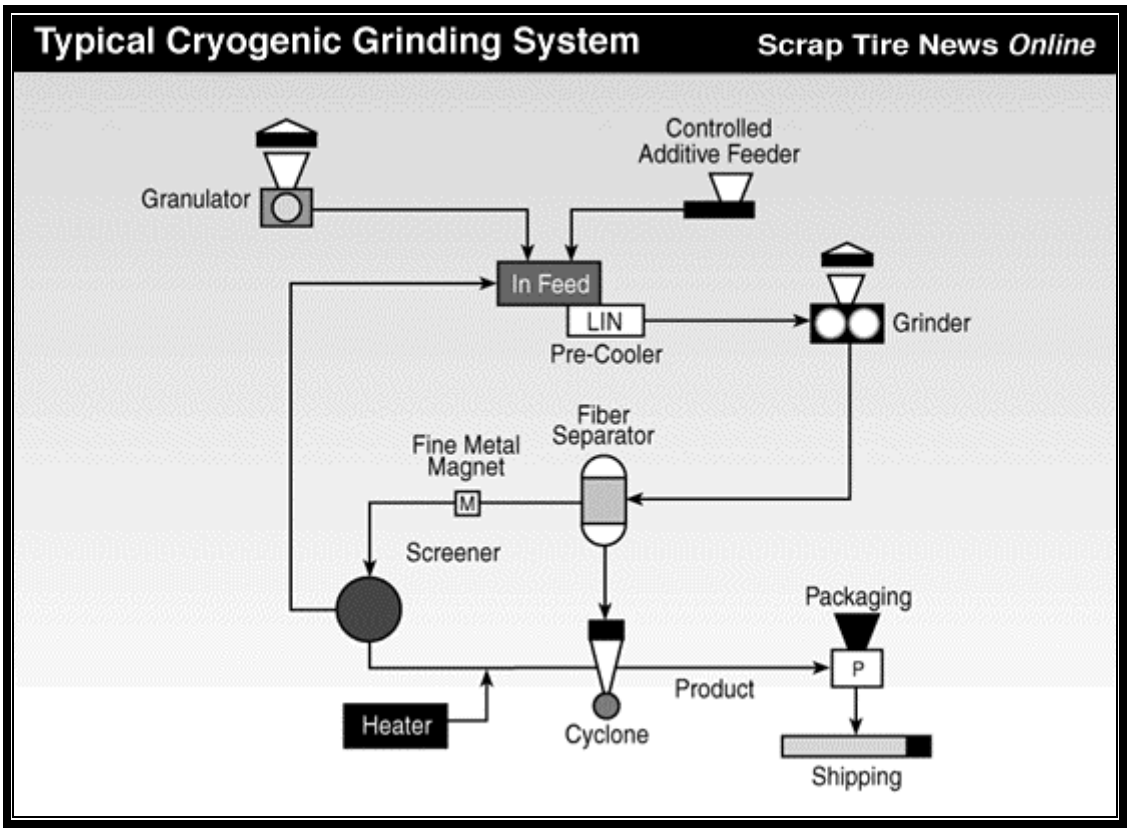


Figura 5.4. Esquema del proceso Criogénico para la molienda de llantas. Tomado de: http://www.scraptirenews.com/areas/crumb/process.html

El acero es separado mediante el empleo de imanes, y la fibra es por medio de aspiración y selección. El material resultante presenta aspecto brillante y limpio, con superficies fracturadas y poco contenido de acero y fibra, debido a que la fragmentación ocurre por las uniones entre la fibra, el acero, y el caucho.

El empleo de temperaturas criogénicas puede ser aplicado en cualquier etapa para la reducción en tamaño de los trozos de llanta. Normalmente el tamaño del material a ser triturado es un nominal de 2 pulgadas, el cual es congelado en una cámara o sumergido en un baño de nitrógeno líquido para reducir la temperatura y posteriormente ser triturado en una unidad de reducción por medio de impacto en un molino de martillo. Este proceso reduce el caucho a partículas entre tamaños de ¼" a mínimo tamiz número 30.

5.1.3.3 Otros procesos. Adicional a las técnicas de molienda convencionales, ambiental y criogénica, se han desarrollado otros procesos como el de molienda-húmeda el cual hoy en día es muy empleado para producir tamaños de grano finos (tamices 40 a 60) y muy finos (tamiz 60) requiriendo de una segunda etapa de alta intensidad de molienda.

También llamado micromolienda, es un proceso de molienda patentado en el que las partículas diminutas de caucho son reducidas a un menor tamaño por molienda entre dos ruedas muy juntas en un medio líquido, el cual generalmente es agua.

5.1.4 Caucho molido utilizado. El GCR que se utilizó en esta investigación fue un grano de caucho desechado producto del reencauche de llantas usadas de camión suministrado por la firma Renovadora de Llantas Ltda. En el proceso de reencauche, la superficie de las llantas usadas es raspada con cuchillas que giran en sentido contrario al movimiento de rotación normal de la llanta, obteniéndose partículas que van desde tamaños de 2.38 mm a 74 μm, libre de fibras y metales. Las partículas superiores a 2 mm son de forma alargada, lo que requiere de un proceso adicional de molienda para lograr un grano

de caucho de menor tamaño con formas redondeadas. Los procesos anteriormente mencionados para obtener el GCR permiten que el caucho conserve el vulcanizado.

Este desecho, conocido como ripio, es vendido a empresas que continúan con el proceso de molienda hasta lograr tamaños adecuados. El producto final es usado en la industria de molduras en caucho, tapetes, suelas, entre otros productos.

5.2 PROCESO POR VÍA SECA

El proceso seco es cualquier método donde el GCR es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, siendo usualmente mezclado con los agregados antes de adicionar el cemento asfáltico. Este proceso se lleva a cabo cuando se quiere usar el GCR como un agregado en la mezcla asfáltica, por lo general, como un sustituto de una pequeña parte del agregado fino, el cual puede estar entre el uno y tres por ciento del peso total de los agregados en la mezcla. A diferencia del proceso húmedo, este proceso no requiere un equipo especial, sólo un sistema de alimentación que proporcione la cantidad adecuada de GCR y que sea suministrada en el momento indicado para que se mezcle con los agregados cuando estos alcancen cierta temperatura y antes de que el ligante sea adicionado.

5.2.1 Tecnologías. Las dos tecnologías más comunes en Estados Unidos para el uso del GCR por la vía seca son la tecnología PlusRide y la tecnología Genérica ó sistema TAK, otra tecnología muy popular es la que emplea granulometrías convencionales, la cual fue desarrollada en España y es actualmente usada en muchos países.

5.2.1.1 PlusRide. Esta tecnología fue originalmente desarrollada en Suecia a finales de los años 1960, y registrada en los Estados Unidos bajo el nombre comercial PlusRide por la

firma EnviroTire. El GCR es agregado a la mezcla asfáltica en proporciones que van de 1 a 3 por ciento del peso total de los agregados. El GCR son partículas que van desde 4.2 mm (1/4") a 2.0 mm (tamiz No 10). El contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica debe estar entre 2 y 4 por ciento, y por lo general son obtenidos con contenidos de ligante entre 7.5 a 9 por ciento.

5.2.1.2 Genérica. Esta tecnología fue desarrollada por el Dr. Barry Takallou a finales de los años 1980 y a principio de los años 1990 para producir mezclas asfálticas en calientes con granulometría densa. Este concepto emplea tanto el GCR grueso como fino para emparejar la granulometría de los agregados obteniendo una mezcla asfáltica mejorada. En este proceso la granulometría del GCR es ajustada para acomodar la granulometría de los agregados. A diferencia de las mezclas PlusRide, la granulometría del GCR se divide en dos fracciones en la que la parte fina se encarga de interactuar con el cemento asfáltico mientras la parte gruesa entra a comportarse como una agregado elástico en la mezcla asfáltica.

El GCR puede llegar a necesitar una pre-reacción o pre-tratamiento con un catalizador para alcanzar un óptimo hinchazón de la partícula. En este sistema, el contenido de GCR no debe exceder el 2 por ciento del peso total de la mezcla para capas de rodadura.

5.2.1.3 Convencional. Esta tecnología fue desarrollada en España para usar el GCR en la mejora de mezclas asfálticas empleando granulometrías convencionales que no implican consumos elevados de cemento asfáltico, pero que aportan menos cantidad de caucho, aproximadamente un dos por ciento del peso total de los agregados. Estas mezclas asfálticas han sido evaluadas dinámicamente en el laboratorio y colocadas en la vía con buenos resultados.

5.2.2 Aplicaciones. El proceso seco puede ser usado para mezclas asfálticas en caliente en granulometrías densas, abiertas o discontinuas. No puede ser usado en otro tipo de aplicaciones como mezclas en frío, sellos, o tratamientos superficiales por ser un proceso en el que no se modifica el ligante.

5.2.2.1 Mezclas asfálticas en caliente. Cuando se usa una mezcla tipo discontinua con GCR la discontinuidad en los tamaños de los agregados produce una textura en la mezcla asfáltica relativamente gruesa que disminuye potencialmente el ahuellamiento y la facilidad de deslizamiento de los vehículos sobre el pavimento. Con propiedades similares al asfalto-caucho, las mejoras en el ligante proporciona características de elasticidad y adhesividad a la mezcla asfáltica, lo que puede incrementar la resistencia al fisuramiento inducido por las capas granulares si las deformaciones no son muy grandes.

Las partículas gruesas del GCR actúan como un agregado en la mezcla asfáltica que puede mejorar el desempeño de la misma. Las partículas de GCR que quedan expuestas en la superficie del pavimento tienen una función importante al impedir que las llantas de los vehículos se deslicen sobre el pavimento ofreciendo un mejor agarre, y las que quedan dentro del cuerpo de la mezcla asfáltica ayudan a retardar el fisuramiento inducido por las capas granulares por absorción de los esfuerzos obstaculizando la propagación de la fisura.

5.3 PROCESO POR VÍA HUMEDA

En el proceso húmedo, el GCR es mezclado con el cemento asfáltico para producir una mezcla modificada asfalto-caucho que es usada de la misma manera que un ligante modificado.

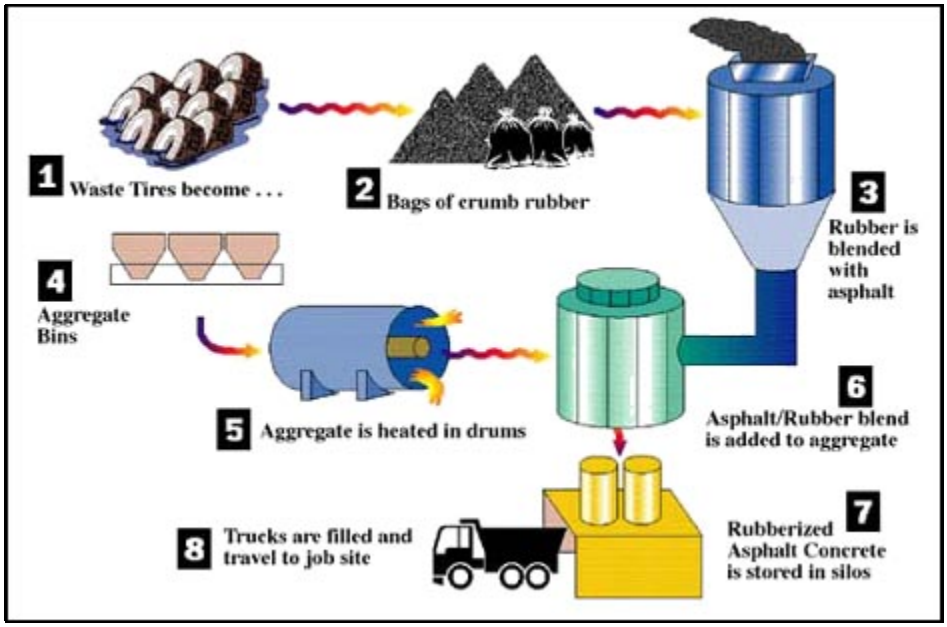


Figura 5.5. Esquema de fabricación de asfalto modificado con caucho por la vía húmeda. Tomado de: http://www.rubberizedasphalt.org/how.htm.

El cemento asfáltico que ha sido modificado con GCR es llamado asfalto-caucho y es el resultado de la interacción del GCR con el ligante, donde la reacción que ocurre entre los dos no es una reacción de tipo química. Cuando el cemento asfáltico y GCR son mezclados, el GCR reacciona con el cemento asfáltico hinchándose y ablandándose por la absorción de aceites aromáticos. El grado de modificación del ligante depende de muchos factores entre los cuales se encuentran el tamaño, textura y proporción del GCR, tipo del cemento asfáltico, tiempo y temperatura de mezclado, grado de agitación mecánica durante la reacción de la mezcla, el componente aromático del cemento de asfáltico, y el uso de otros aditivos.

5.3.1 Modificación del ligante. La reacción entre el cemento asfáltico y el GCR implica, como ya se ha dicho, la absorción de aceites aromáticos del cemento asfáltico por el GCR en las cadenas de polímero, las cuales comprenden los componentes principales de la estructura del caucho natural y sintético.

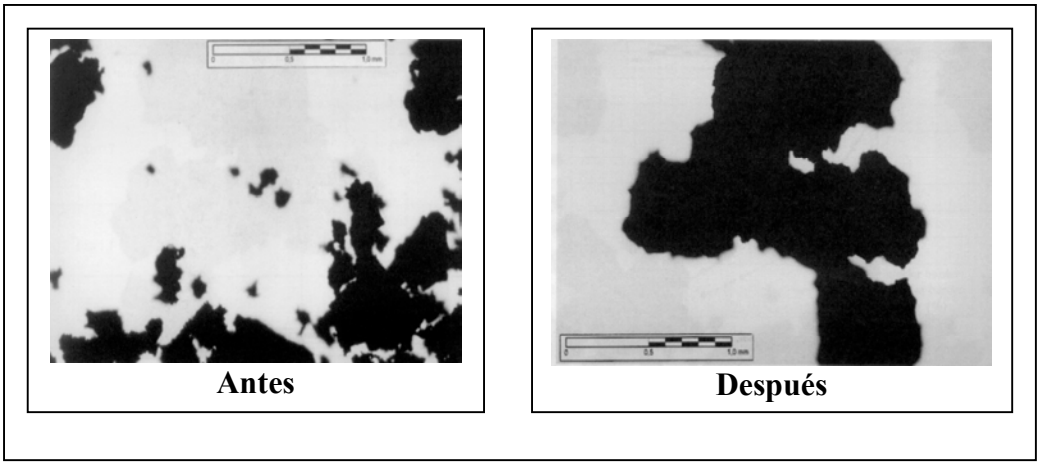


Figura 5.6. Partícula de caucho antes y después de ser mezclada con cemento asfáltico. Tomado de: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference.

La reacción entre GCR y el cemento asfáltico puede ser aumentada ampliando el área superficial del GCR, la temperatura de mezclado y el tiempo de agitación. La viscosidad de la mezcla es el principal parámetro usado para supervisar la reacción. Para una reacción especificada, por razones económicas, el tiempo escogido deberá ser el mínimo a una temperatura seleccionada.

Entre las tecnologías usadas en el proceso húmedo están: el mezclado por bachadas ó tecnología McDonald, mezclado continuo, y mezclado terminal.

5.3.1.1 Tecnología por bachadas. Esta metodología consiste en una producción de mezclado de asfalto y caucho por bachadas. Las primeras aplicaciones en el proceso húmedo fueron bachadas y se basaron en la tecnología McDonald, que fue desarrollada a comienzos de los años 1960 por Charles McDonald, y patentada en los años 1970 por la Arizona Refining Company (ARCO). Hoy en día existen numerosas patentes relacionadas con la tecnología McDonald, muchas de las cuales ya han expirado y otras cuantas todavía se encuentran vigentes.

5.3.1.2 Tecnología continua. Este proceso consiste en un sistema de producción de mezclado de asfalto y caucho de manera continua. La tecnología de mezclado continua fue desarrollada en Florida a finales de los años 1980 y es conocida como Florida Wet Process. En este proceso, un tamaño fino 0.18 mm (tamiz No. 80) de GCR es mezclado con el cemento asfáltico en un proceso continuo. La tecnología de Florida se diferencia del proceso McDonald en varios aspectos: emplea bajos porcentajes de GCR, entre 8 y 10 por ciento, el tamaño de la partícula de caucho requerida es más pequeña, disminuye la temperatura de mezclando, y acorta el tiempo de reacción. El proceso húmedo de Florida aún no ha sido patentado.

5.3.1.3 Tecnología terminal. La tecnología de mezclado Terminal es un proceso húmedo que brinda la capacidad de mezclar o combinar el cemento asfáltico con el GCR y conservar el producto durante amplios períodos de tiempo. Este producto asfalto-caucho tiene una amplia duración de almacenamiento y puede ser mezclado en la refinería donde se produce el cemento asfáltico por cualquiera de las dos tecnologías, continua o por bachadas.

5.3.2 Aplicaciones. El cemento asfáltico modificado con GCR mediante el proceso húmedo ha sido usado ampliamente como ligante en la reparación de grietas y sello de juntas, tratamientos superficiales, membranas retardantes de fisuras, y en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente.[2]

5.3.2.1 Sellantes. El ligante modificado como material sellante tiene un excelente desempeño y es una buena alternativa en cuanto a su costo efectivo. Entre las propiedades

[2] ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. State of the practice – Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Washington : FHWA, 1992. p. 28. ISBN FHWA-92-022

ingenieriles que este aporta están la mejora en la susceptibilidad térmica, reduce el envejecimiento, y mejora la durabilidad ante el ataque de agentes agresores como el agua, el clima y la radiación ultravioleta. Las cadenas del polímero mejoran la viscosidad del ligante a altas temperaturas sin alterar de manera significante la viscosidad a bajas temperaturas, aumentando la capacidad elástica del ligante aportándole flexibilidad.

La escogencia de un sellante para un trabajo cualquiera se debe hacer de acuerdo al tipo de pavimento, forma, tamaño y tipo de la grieta o junta, tiempo previsto para una próxima rehabilitación, volumen del tráfico, magnitud de los esfuerzos en el pavimento, temperaturas máxima y mínima, eficacia de equipos y operarios, y control del tráfico.

En muchos países estos ligantes modificados con GCR son premezclados y empacados para luego ser utilizados en obra calentándolos a 175°C, debiendo ser usados durante las 12 horas siguientes a su calentamiento. Aún a la temperatura de aplicación este ligante modificado es muy viscoso y no se auto nivelará después de ser aplicado. Para obtener una óptima adhesión entre el pavimento y el sellante, la temperatura del pavimento debe estar por encima de 5°C.

5.3.2.2 Tratamientos superficiales. El asfalto-caucho puede ser usado como ligante en un tratamiento superficial. La susceptibilidad térmica y la elasticidad del ligante modificado con GCR ayudan a que la mezcla resista los esfuerzos inducidos por el clima y el tráfico.

El contenido de negro de humo en el caucho ayuda a que el proceso de envejecimiento de la mezcla disminuya, factor importante en la duración del tratamiento superficial. Finalmente, la capacidad del ligante para retener y cubrir los agregados es mejorada por las características de adhesión que aporta el nuevo ligante. A pesar de los beneficios aportados por el cemento asfáltico modificado con GCR su costo es significativamente alto comparado con un tratamiento superficial convencional.

Fotografía 5.2. Aplicación de asfalto-caucho en un tratamiento superficial. Tomado de: http://www.allstatesasphalt.com/nf-sv-6.htm.

Para el diseño de un tratamiento superficial con este ligante se debe tener en cuenta la mezcla asfalto-caucho y los agregados a cubrir. La consistencia del asfalto-caucho puede ser reducida con un diluyente para mejorar el flujo en el sistema de irrigación. El diluyente es normalmente un producto más ligero que el petróleo, normalmente se usa kerosén, el cual es adicionado a la mezcla asfalto-caucho justo antes de ser aplicado a la superficie del pavimento. La dosis de aplicación del diluyente es aproximadamente 5 a 7 por ciento del peso del asfalto-caucho. Como el diluyente escogido puede afectar el tiempo de curado, inmediatamente después de la construcción se puede colocar una pequeña capa de arena para minimizar el desprendimiento de partículas y de asfalto-caucho en el proceso de curado.

Los agregados a cubrir son otro factor importante en el diseño de la mezcla asfalto-caucho, donde una apropiada selección de la granulometría y forma del agregado son importantes en el buen desarrollo del tratamiento superficial. Los agregados deben estar relativamente limpios para obtener un óptima adhesión con la mezcla. La compatibilidad de la mezcla y los agregados también es un factor determinante del diseño, por lo tanto es necesario realizar un ensayo de adherencia.

Seguido a la escogencia de los materiales el ingeniero de vías debe determinar la velocidad apropiada de aplicación del riego con el irrigador y la extensión de los agregados para lograr un apropiado cubrimiento y embebido.

5.3.2.3 Mezclas asfálticas en caliente. El uso del GCR en las mezclas asfálticas en caliente tiene una mayor variabilidad y potencial que en las aplicaciones anteriormente discutidas. Este tipo de ligante modificado con GCR es apto para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente de tipo densas, abiertas y discontinuas. El proceso de elaboración de las mezclas asfálticas con asfalto-caucho es igual al de un ligante modificado.

Entre los principales beneficios que se obtienen usando asfalto-caucho en mezclas asfálticas en caliente está la reducción de la susceptibilidad térmica, con lo que las características de resistencia a la fatiga en la mezcla asfáltica pueden llegar a ser mas uniformes durante las temperaturas de operación del pavimento. Esta reducción puede incrementar también la resistencia al ahuellamiento a altas temperaturas y la resistencia al fisuramiento térmico a bajas; adicionalmente reduce la oxidación y envejecimiento de la mezcla asfáltica por el contenido de negro de humo que el GCR aporta y por una gruesa capa de ligante que se forma sobre los agregados debido a la alta viscosidad del asfalto-caucho. Esta gruesa capa de ligante sobre los agregados ayuda así mismo a reducir el desprendimiento de los agregados del pavimento. El aumento de la elasticidad del ligante puede incrementar la resistencia al fisuramiento inducido por las capas granulares.

El nivel de mejoramiento depende de muchos factores. Por ejemplo, si se presentan problemas de ahuellamiento, el principal factor en la estabilidad de la mezcla está en el contacto entre los agregados, donde cualquier mejora que se le haga al ligante no corregirá la situación a no ser de que se corrija la granulometría de los mismos. El grado de mejora está reflejado en la importancia del ligante para una determinada mezcla.

6 PROCEDIMIENTO

En este capítulo se describe cómo se desarrolló el trabajo de investigación, la metodología seguida, los procedimientos desarrollados en los cuales se especifican los ensayos realizados, las características de los materiales utilizados, y los criterios de selección de las mezclas asfalto-caucho y las mezclas asfálticas mejoradas con GCR.

6.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

6.1.1 Agregados pétreos. En el sentido general de la palabra, los agregados, también llamados áridos, son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento asfáltico conforman un todo compacto conocido como mezcla asfáltica.

Se denomina agregado grueso a la porción del agregado retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4), agregado fino a la porción comprendida entre los tamices 4.75 mm y 75 μm (No. 4 y No. 200) y llenante mineral la que pase el tamiz de75 μm (No. 200).

6.1.1.1 Especificaciones INVIAS. De acuerdo a las especificaciones del INVIAS en el Artículo 400-96, el cual trata "Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos" en el aparte 400.2.1 de Agregados y llenante mineral, las especificaciones para los agregados son las siguientes:

"Los agregados pétreos empleados para la ejecución de cualquier tratamiento o mezcla bituminosa deberán poseer una naturaleza tal, que al aplicársele una capa de material asfáltico por utilizar en el trabajo, ésta no se desprenda por la acción del agua y del tránsito".

"El agregado grueso deberá proceder de la trituración de roca o de grava o por una combinación de ambas; sus fragmentos deberán ser limpios, resistentes y durables, sin exceso de partículas planas alargadas, blandas o desintegrables. Estará exento de polvo, tierra, terrones de arcilla u otras sustancias objetables que puedan impedir la adhesión completa del asfalto. Sus requisitos básicos de calidad se presentan en la Tabla 400.1".

"El agregado fino estará constituido por arena de trituración o una mezcla de ella con arena natural. Los granos del agregado fino deberán ser duros, limpios y de superficie rugosa y angular. El material deberá estar libre de cualquier sustancia que impida la adhesión del asfalto y deberá satisfacer los requisitos de calidad indicados en la tabla 400.1".

"El llenante mineral podrá provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos o podrá ser de aporte como producto comercial, generalmente cal hidratada o cemento Portland. Su peso aparente, determinado por el ensayo de sedimentación en tolueno (norma de ensayo INV E-225), deberá encontrarse entre cinco y ocho décimas de gramo por centímetro cúbico (0.5 y 0.8 g/cm^3) y su coeficiente de emulsibilidad (norma INV E-776) deberá ser inferior a seis décimas (0.6)."

"La mezcla de los agregados grueso y fino y el llenante mineral deberá ajustarse a las exigencias de la respectiva especificación, en cuanto a su granulometría".

Cuadro 6.1. Requisitos de los agregados pétreos para tratamientos y mezclas bituminosas

Tipo de Tto. o mezcla	Part. Frac. Mec (Agre. grueso)	Desgaste Los Angeles	Pérd. en ensayo de solidez sulf. de sodio	Adhesividad				Inmersión-compresión.	Indice Aplana. y Alarg	Coef. Pulim. Aceler.	I. P.	Equiv. de arena
				Sulf. de magnesio	Riedel Webber	Stripping	Bandeja					
Norma INV	E-227	E-218/E-219	E-220	E-220	E-774	E-737	E-740	E-738	E-230	E-232	E-125/E-126	E-133
SELLO DE ARENA ASFALTO				12% máx	18% máx	4 mín					N. P.	50% mín
TTO. SUPERF. SIMPLE Y DOBLE	75% mín	40% máx	12% máx	18% máx			80% mín		35% máx	0.45 mín		
LECHADA ASFALTICA		35% máx	12% máx	18% máx	4 mín						N. P.	50% mín
MEZCLA ABIERTA EN FRIO		75% mín	35% máx (base) 30% máx (rodadura)	12% máx	18% máx		95% mín			35% máx	0.45 mín (rodadura)	
MEZCLA DENSA EN FRIO												
- Agregado grueso	75% mín	40% máx (base) 30% máx (rodadura)	12% máx	18% máx					35% máx	0.45 mín		
- Agregado fino			12% máx	18% máx								
- Gradación combinada								75% mín			N. P.	50% mín
MEZCLA ABIERTA EN CALIENTE		75% mín	35% máx	12% máx	18% máx		95% mín			35% máx		
MEZCLA DENSA EN CALIENTE												
- Agregado grueso	75% mín	40% máx (base) 30% máx (rodadura)	12% máx	18% máx					35% máx	0.45 mín		
- Agregado fino			12% máx	18% máx								
- Gradación combinada								75% mín			N. P.	50% mín
RECICLADO DEL PAVIMENTO EXISTENTE (material de adición)	50% mín	40% máx	12% máx	18% máx					35% máx		N. P.	30% mín en frío, 50% mín en caliente

Fuente: Tabla 400.1, Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS.

6.1.1.2 Agregados pétreos utilizados. Se caracterizaron agregados provenientes de tres canteras representativas de la ciudad y de la mejor calidad posible dentro de los tipos normalmente utilizados.

Los agregados estudiados provinieron de las siguientes canteras:

Tabla 6.1. Procedencia de agregados estudiados.

Cantera No.	Código	Empresa	Procedencia
1	AGR-1	Mario Huertas	El vino
2	AGR-2	Bogotana de Asfaltos	Subachoque
3	AGR-3	Conagre Ltda	Tunjuelito

6.1.1.3 Ensayos realizados. A estos materiales se le realizaron los siguientes ensayos de caracterización, siguiendo las normas técnicas establecidas por el INVIAS en las Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Tomo II.

- Clasificación del material granular.
- Determinación del porcentaje de humedad evaporable en los agregados.
- Determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados gruesos y finos.
- Determinación de la resistencia al desgaste de los agregados, por medio de la máquina de Los Ángeles.
- Determinación de la presencia de elementos arcillosos en los materiales finos mediante el ensayo de Azul de Metileno.
- Determinación del peso específico, masa unitaria y absorción de los agregados.
- Determinación del Índice de partículas de agregado como una medida general de sus características de forma y textura.

Todos los ensayos se realizaron por triplicado con el fin de obtener parámetros promedio para adelantar los posteriores diseños de mezclas asfálticas.

6.1.1.3.1 Determinación de materiales finos. Dentro de los materiales que presentan efectos perjudiciales en una mezcla asfáltica, porque pueden impedir la adhesión completa del ligante con los agregados, se encuentran la arcilla, el limo y los polvos procedentes de trituración; por lo tanto los agregados deberán estar exentos de polvo, tierra y terrones de arcilla. A causa de lo anterior es necesario controlar el contenido de estas partículas indeseables. Este ensayo se realizó por medio del azul de metileno, método de la mancha, de acuerdo a la norma francesa P18-592.

El producto del azul de metileno por finos totales para tres ensayos realizados sobre diferentes muestras del agregado son los siguientes:

Cuadro 6.2. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 1.

Muestra	1	2	3
Índice de Azul de Metileno [g/100g]	1.24	1.53	1.69
Producto Azul de Metileno x Finos Totales [%]	8.56	10.57	11.64

Cuadro 6.3. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 2.

Muestra	1	2	3
Índice de Azul de Metileno [g/100g]	0.96	1.24	1.58
Producto Azul de Metileno x Finos Totales [%]	2.78	3.59	4.57

Cuadro 6.4. Determinación de materiales finos por medio de azul de metileno del agregado pétreo, cantera No. 3.

Muestra	1	2	3
Índice de Azul de Metileno [g/100g]	0.04	0.04	0.04
Producto Azul de Metileno x Finos Totales [%]	0.08	0.10	0.10

Según las especificaciones IDU en el aparte D.3.6.2.2 del capítulo Materiales básicos, y el aparte F.2.5 referente a las especificaciones para granulares de mezclas asfálticas para capas de rodadura y liga, el material de la cantera 3 cumple como material para la fabricación de mezcla asfáltica en caliente por clasificar en la categoría **a** con un índice de azul de metileno menor a uno.

6.1.1.3.2 Resistencia al desgaste. El objetivo del ensayo de resistencia al desgaste es el medir la dureza del material, propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia de los agregados. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-218.

Cuadro 6.5. Resistencia al desgaste de agregados.

Muestra	1	2	3
Cantera	Desgaste [%]		
No. 1	22.0	19.8	21.4
No. 2	48.8	49.5	48.5
No. 3	22.4	23.0	24.0

Según las especificaciones del INVIAS para mezcla densa en caliente, el material de las canteras 1 y 3 cumple para rodadura por ser menor de 30%.

6.1.1.3.3 Pesos específicos y absorción, y masa unitaria. Dentro de las propiedades físicas de los agregados que dependen directamente de las propiedades de la roca original de donde provienen, se encuentra la densidad, la cual está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada.[3] Estos ensayos se realizaron de acuerdo a las normas NTC 176 y NTC 92.

Cuadro 6.6. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 1.

Agregado	Arena			Grava		
Muestra	1	2	3	1	2	3
Masa unitaria suelta [g/cm³]	1.36	1.37	1.36	1.43	1.44	1.43
Masa unitaria compacta [g/cm³]	1.43	1.43	1.42	1.68	1.67	1.68
Peso específico	2.64	2.64	2.65	2.53	2.53	2.52
Absorción [%]	1.37	1.19	1.62	4.92	5.14	4.77

[3] SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 2 *ed*. Santa Fe de Bogotá: Brandar, 1993. p. 95

Cuadro 6.7. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 2.

Agregado	Arena			Grava		
Muestra	1	2	3	1	2	3
Masa unitaria suelta [g/cm³]	1.52	1.52	1.52	1.40	1.40	1.40
Masa unitaria compacta [g/cm³]	1.65	1.65	1.65	1.57	1.58	1.58
Peso específico	2.64	2.64	2.64	2.53	2.53	2.53
Absorción [%]	0.77	0.84	0.63	4.73	4.57	4.56

Cuadro 6.8. Pesos específicos y Unitarios del agregado pétreo, cantera No 3.

Agregado	Arena			Gravilla			Grava		
Muestra	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Masa unitaria suelta [g/cm³]	1.58	1.58	1.58	1.40	1.40	1.40	1.38	1.39	1.39
Masa unitaria compacta [g/cm³]	1.75	1.75	1.75	1.55	1.55	1.55	1.54	1.54	1.54
Peso específico	2.62	2.62	2.62	2.48	2.48	2.47	2.49	2.49	2.49
Absorción [%]	1.02	0.99	0.97	2.81	2.71	2.85	2.52	2.40	2.37

6.1.1.3.4 Índice de forma y textura. Los agregados procedentes de rocas naturales sometidas a un proceso de trituración y clasificación tienen formas geométricas que varían desde las aproximadamente cúbicas o poliédricas, a las de esquirlas alargadas o astilladas, a las laminares aplanadas, o a las de forma de cascos. Mientras que los agregados de río o de depósitos (arrastres fluviales o glaciares) tienen formas de cantos redondeados (cantos rodados), o aplanadas (medallón).[4]

En términos prácticos, la forma de las partículas del agregado juega un papel muy importante en la fabricación de mezclas asfálticas, debido a que la aptitud de compactación de la mezcla no solo depende de la granulometría del agregado sino también del grado de acomodamiento de las partículas. Otra propiedad que corresponde intrínsecamente al agregado, pero que se deriva indirectamente de la roca madre, es la textura superficial, que también incide notablemente en las propiedades de la mezcla asfáltica.

[4] SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Op. Cit., p. 91

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-231, la cual proporciona un valor índice para las características relativas de forma y textura de las partículas del agregado. Este valor es una medida cuantitativa de aquellas características de forma y textura que pueden afectar el desempeño de mezclas para vías y pavimentos.

Cuadro 6.9. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 1.

Fracción ensayada				Índice de partículas		
Pasa tamiz		Retenida en Tamiz		1	2	3
19.0 mm	¾"	12.5 mm	½"	11.7	12.0	11.7
12.5 mm	½"	9.50 mm	3/8"	13.3	13.5	13.6
9.50 mm	3/8"	4.75 mm	No. 4	13.1	13.1	13.3
4.75 mm	No. 4	2.36 mm	No. 8	13.1	13.1	13.3
2.36 mm	No. 8	1.18 mm	No. 16	13.1	13.1	13.3
1.18 mm	No. 16	600 µm	No. 30	13.1	13.1	13.3
600 µm	No. 30	300 µm	No. 50	13.1	13.1	13.3
300 µm	No. 50	150 µm	No. 100	13.1	13.1	13.3
150 µm	No. 100	75 µm	No. 200	13.1	13.1	13.3

Cuadro 6.10. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 2.

Fracción ensayada				Índice de partículas		
Pasa tamiz		Retenida en Tamiz		1	2	3
19.0 mm	¾"	12.5 mm	½"	12.2	12.1	12.4
12.5 mm	½"	9.50 mm	3/8"	13.3	13.0	12.9
9.50 mm	3/8"	4.75 mm	No. 4	11.3	11.0	11.1
4.75 mm	No. 4	2.36 mm	No. 8	11.3	11.0	11.1
2.36 mm	No. 8	1.18 mm	No. 16	11.3	11.0	11.1
1.18 mm	No. 16	600 µm	No. 30	11.3	11.0	11.1
600 µm	No. 30	300 µm	No. 50	11.3	11.0	11.1
300 µm	No. 50	150 µm	No. 100	11.3	11.0	11.1
150 µm	No. 100	75 µm	No. 200	11.3	11.0	11.1

Cuadro 6.11. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Arena.

Fracción ensayada				Índice de partículas		
Pasa tamiz		Retenida en Tamiz		1	2	3
19.0 mm	¾"	12.5 mm	½"			
12.5 mm	½"	9.50 mm	3/8"			
9.50 mm	3/8"	4.75 mm	No. 4	9.4	9.3	9.3
4.75 mm	No. 4	2.36 mm	No. 8	9.8	9.8	9.7
2.36 mm	No. 8	1.18 mm	No. 16	13.1	12.8	12.8
1.18 mm	No. 16	600 µm	No. 30	14.5	14.5	22.1
600 µm	No. 30	300 µm	No. 50	13.1	13.1	6.5
300 µm	No. 50	150 µm	No. 100	12.8	13.2	13.0
150 µm	No. 100	75 µm	No. 200	12.8	13.2	13.0

Cuadro 6.12. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Gravilla.

Fracción ensayada				Índice de partículas		
Pasa tamiz		Retenida en Tamiz		1	2	3
19.0 mm	¾"	12.5 mm	½"	9.4	9.3	9.4
12.5 mm	½"	9.50 mm	3/8"	8.5	8.6	8.5
9.50 mm	3/8"	4.75 mm	No. 4	9.4	9.3	7.6
4.75 mm	No. 4	2.36 mm	No. 8	9.4	9.3	7.6
2.36 mm	No. 8	1.18 mm	No. 16	9.4	9.3	7.6
1.18 mm	No. 16	600 µm	No. 30	9.4	9.3	7.6
600 µm	No. 30	300 µm	No. 50	9.4	9.3	7.6
300 µm	No. 50	150 µm	No. 100	9.4	9.3	7.6
150 µm	No. 100	75 µm	No. 200	9.4	9.3	7.6

Cuadro 6.13. Determinación del índice de partícula del agregado pétreo, cantera No. 3 - Grava.

Fracción ensayada				Índice de partículas		
Pasa tamiz		Retenida en Tamiz		1	2	3
19.0 mm	¾"	12.5 mm	½"	8.5	8.7	9.5
12.5 mm	½"	9.50 mm	3/8"	8.5	8.7	9.5
9.50 mm	3/8"	4.75 mm	No. 4	8.5	8.7	9.5
4.75 mm	No. 4	2.36 mm	No. 8	8.5	8.7	9.5
2.36 mm	No. 8	1.18 mm	No. 16	8.5	8.7	9.5
1.18 mm	No. 16	600 µm	No. 30	8.5	8.7	9.5
600 µm	No. 30	300 µm	No. 50	8.5	8.7	9.5
300 µm	No. 50	150 µm	No. 100	8.5	8.7	9.5
150 µm	No. 100	75 µm	No. 200	8.5	8.7	9.5

6.1.1.3.5 Análisis granulométrico. La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico, el cual consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.[5] A continuación se presenta el resultado del análisis granulométrico y la respectiva curva granulométrica. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma NTC 77.

Cuadro 6.14. Granulometría agregado pétreo, cantera No. 1

Tamiz	Abertura del tamiz		Porcentaje que pasa [%]		
No.	pulg.	mm	1	2	3
	1	25.400	100.00	100.00	100.00
	3/4	19.000	93.10	92.77	92.78
	1/2	12.700	63.22	67.94	67.97
	3/8	9.510	51.27	56.77	56.79
4	0.1874	4.760	33.71	37.55	37.56
8	0.0937	2.380	24.45	28.68	28.68
16	0.0469	1.190	21.32	24.67	24.66
30	0.0234	0.595	15.82	16.12	16.14
50	0.0117	0.297	9.90	9.94	9.94
100	0.0059	0.149	8.19	8.08	8.08
200	0.0029	0.074	6.91	6.86	6.88
Fondo			0.00	0.00	0.00
Tamaño máximo [mm]			25.4	25.4	25.4
Tamaño máximo nominal [mm]			19.0	19.0	19.0
Módulo de finura [%]			6.72	6.51	6.51
Cu			39.33	34.33	34.67
Cc			3.66	2.27	2.17

[5] SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Op. Cit., p. 72.

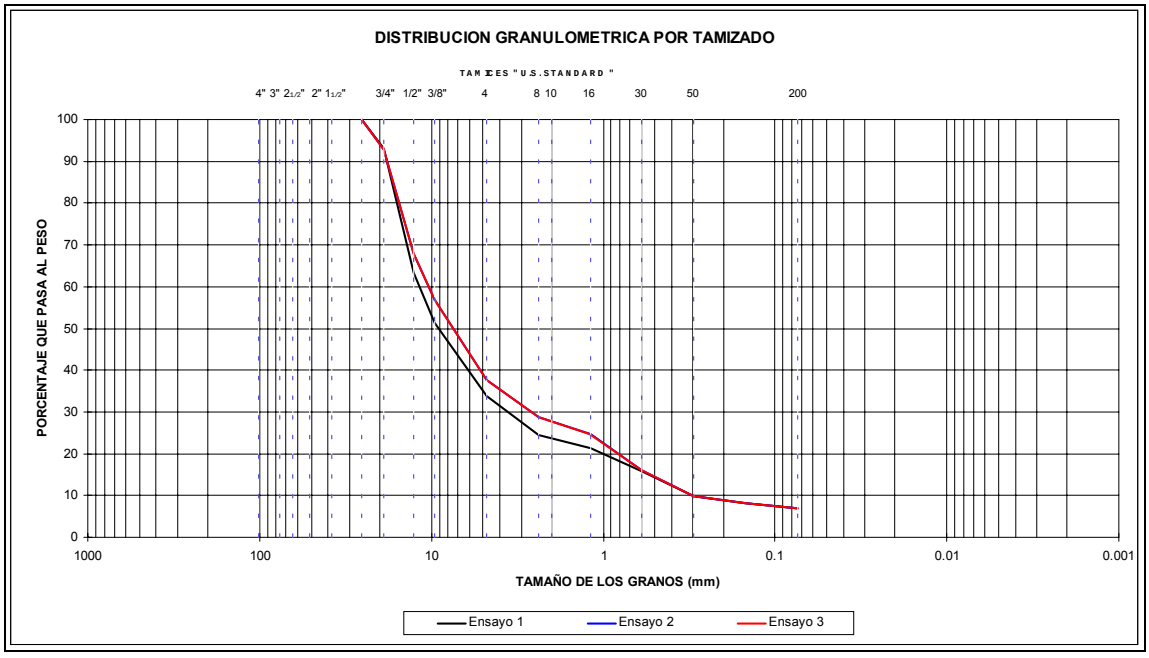


Figura 6.1. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 1.

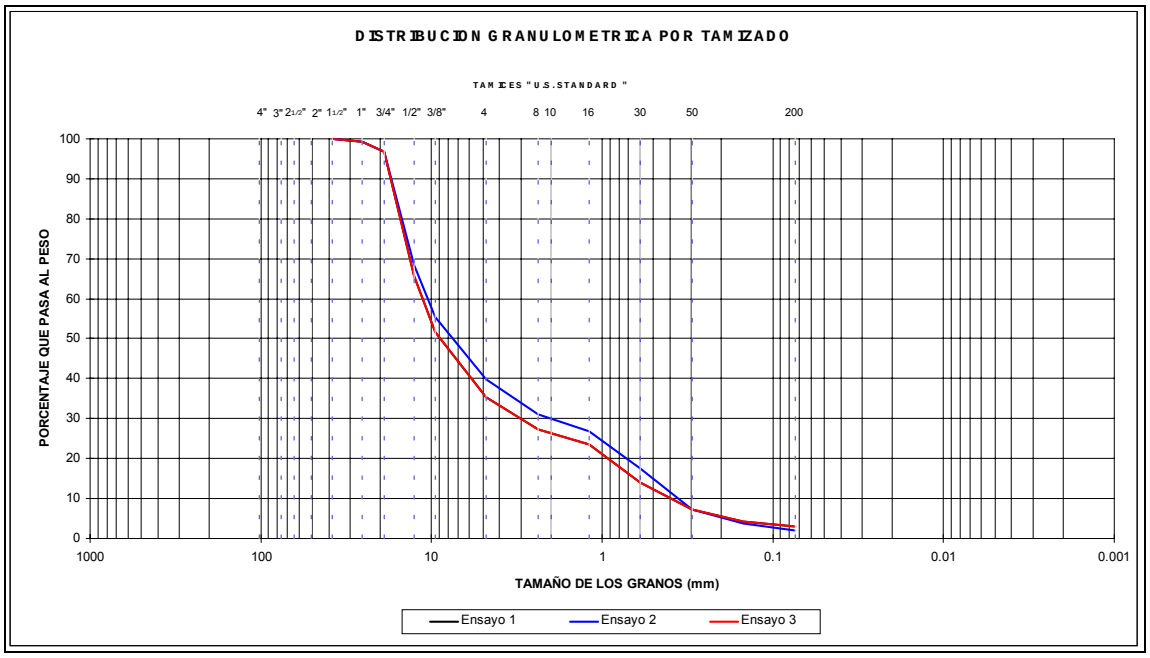


Figura 6.2. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 2.

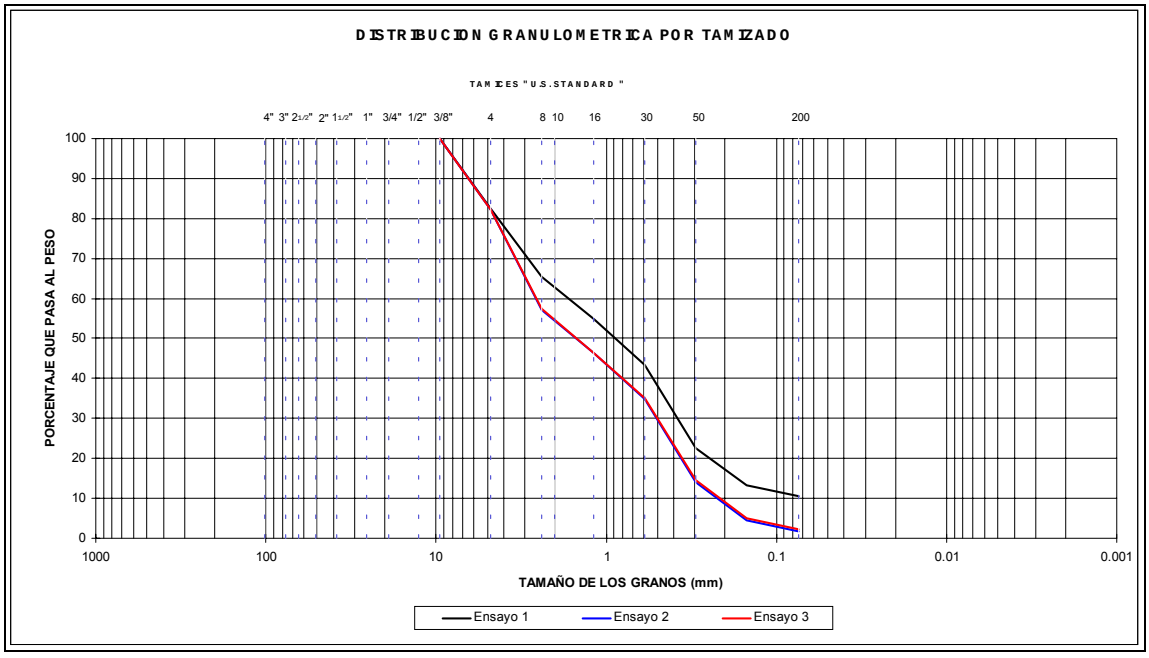


Figura 6.3. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Arenas.

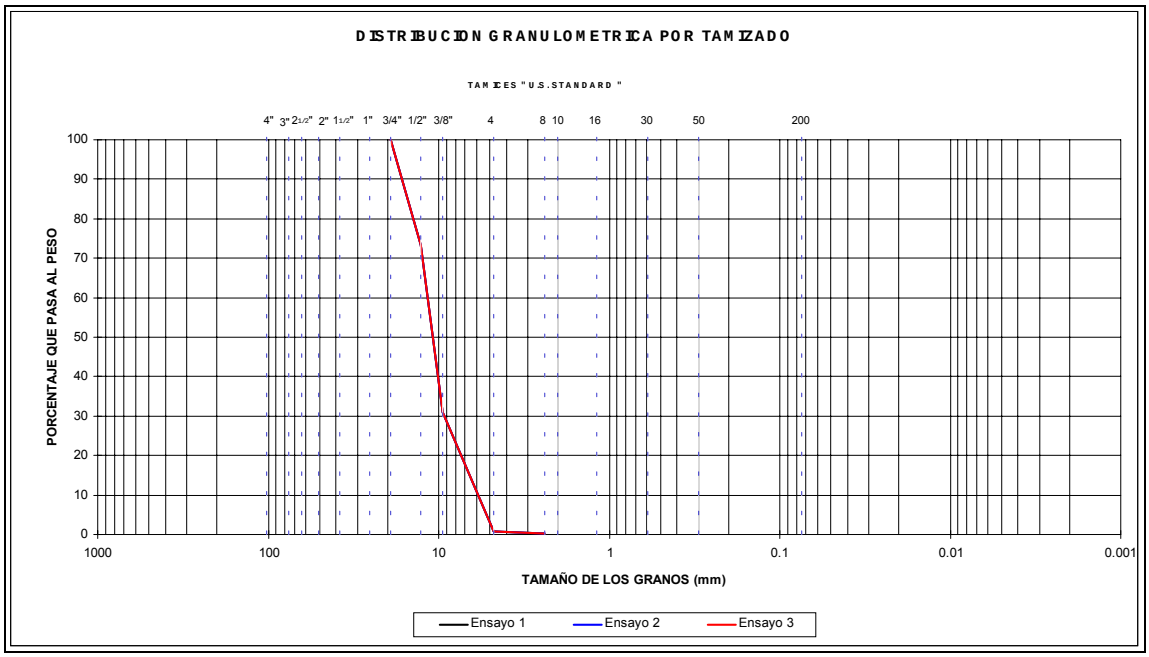


Figura 6.4. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Gravillas.

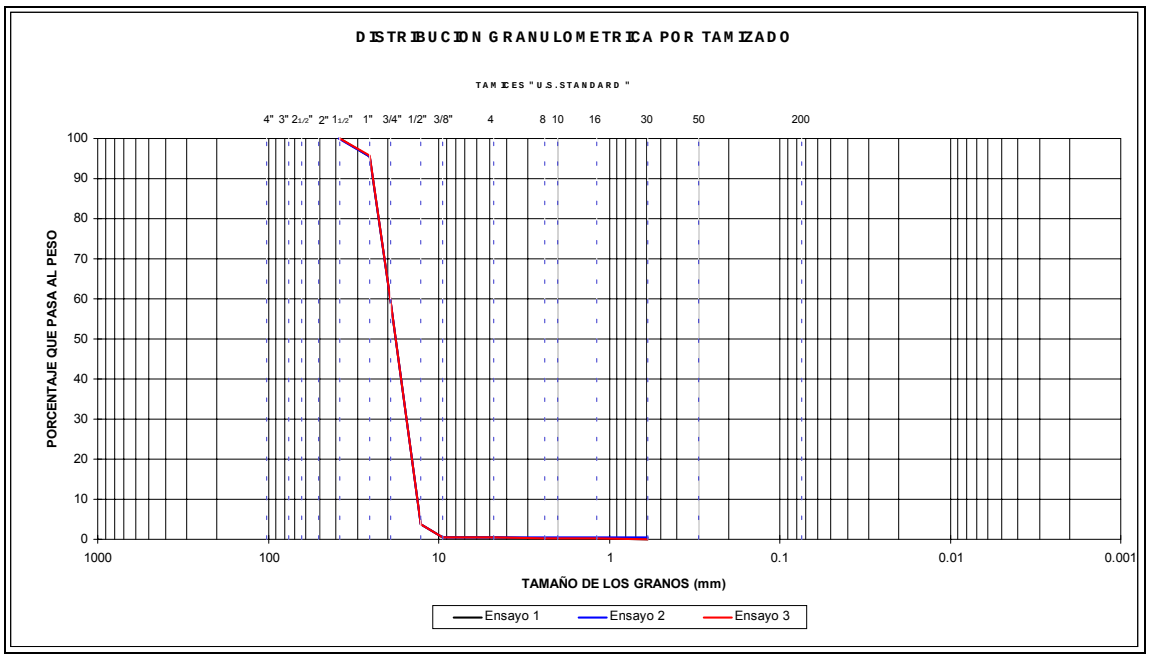


Figura 6.5. Curva distribución granulométrica agregados, cantera No. 3, Gravas.

6.1.1.3.6 Clasificación. Existen varios métodos de clasificación de suelos, el conocido como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes AASHTO, el Sistema del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos USDA, el sistema de la ASTM, y el sistema de la Agencia Federal de Aviación FAA, entre otros[6]. Todos los sistemas de clasificación utilizan los límites de Atterberg con un análisis parcial o total de granulometría. Para esta investigación se utilizó el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

[6] BOWLES, Joseph. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil. 1 *ed*. México: MGCRaw-Hill, 1982. p. 69.

Cuadro 6.15. Clasificación del agregado pétreo, cantera 1.

Parámetros de Clasificación	1	2	3
Porcentaje que pasa Tamiz No. 200	6.91	6.86	6.88
Porcentaje de la fracción gruesa retenida Tamiz No. 4	66.29	62.45	62.44
Coeficiente de Uniformidad Cu	39.33	34.33	34.67
Coeficiente de Concavidad Cc	3.66	2.27	2.17
Límite Líquido	NL	NL	NL
Límite Plástico	NP	NP	NP
Índice Plástico	-	-	-
Símbolo del Grupo	**GP**	**GW**	**GW**

Cuadro 6.16. Clasificación del agregado pétreo, cantera 2.

Parámetros de Clasificación	1	2	3
Porcentaje que pasa Tamiz No. 200	2.89	2.00	2.90
Porcentaje de la fracción gruesa retenida Tamiz No. 4	64.75	60.14	64.75
Coeficiente de Uniformidad Cu	28.72	30.00	28.25
Coeficiente de Concavidad Cc	2.06	1.09	1.99
Límite Líquido	NL	NL	NL
Límite Plástico	NP	NP	NP
Índice Plástico	-	-	-
Símbolo del Grupo	**GP**	**GW**	**GW**

Cuadro 6.17. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Arenas.

Parámetros de Clasificación	1	2	3
Porcentaje que pasa Tamiz No. 200	10.50	1.88	2.22
Porcentaje de la fracción gruesa retenida Tamiz No. 4	17.65	17.74	17.70
Coeficiente de Uniformidad Cu	22.57	11.82	11.86
Coeficiente de Concavidad Cc	1.17	0.45	0.47
Límite Líquido	NL	NL	NL
Límite Plástico	NP	NP	NP
Índice Plástico	-	-	-
Símbolo del Grupo	**SW**	**SP**	**SP**

Cuadro 6.18. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Gravilla.

Parámetros de Clasificación	1	2	3
Porcentaje que pasa Tamiz No. 200	0.03	0.22	0.24
Porcentaje de la fracción gruesa retenida Tamiz No. 4	99.16	99.18	99.16
Coeficiente de Uniformidad Cu	1.98	1.97	1.98
Coeficiente de Concavidad Cc	1.27	1.26	1.27
Límite Líquido	NL	NL	NL
Límite Plástico	NP	NP	NP
Índice Plástico	-	-	-
Símbolo del Grupo	**GP**	**GP**	**GP**

Cuadro 6.19. Clasificación del agregado pétreo, cantera 3, Grava.

Parámetros de Clasificación	1	2	3
Porcentaje que pasa Tamiz No. 200	0.08	0.40	0.09
Porcentaje de la fracción gruesa retenida Tamiz No. 4	99.59	99.60	99.55
Coeficiente de Uniformidad Cu	1.44	1.44	1.43
Coeficiente de Concavidad Cc	0.93	0.92	0.93
Límite Líquido	NL	NL	NL
Límite Plástico	NP	NP	NP
Índice Plástico	-	-	-
Símbolo del Grupo	**GP**	**GP**	**GP**

La clasificación da como resultado un suelo GP, que corresponde a una grava pobremente gradada ó mezcla grava-arena, con pocos o ningún fino.

6.1.2 Cemento asfáltico. Los ligantes son constituidos por la fracción más pesada obtenida de la destilación al vacío del crudo reducido (fondos de la destilación atmosférica del petróleo). Normalmente son hidrocarburos pesados de color oscuro, y pueden ser líquidos o sólidos solubles en cloruro de carbono.

El uso principal del cemento asfáltico es la construcción y conservación de vías. Pueden aplicarse de diferentes formas tales como emulsiones asfálticas, asfaltos líquidos o como cemento asfáltico. Aunque son productos estables, debe tenerse cuidado al calentarlos a

temperaturas elevadas debido a que los vapores emitidos pueden hacer combustión en presencia de llama. Para su manejo deben aplicarse todas las medidas de seguridad establecidas para manipulación de materiales a altas temperaturas.

Actualmente en el país la única entidad que produce cemento asfáltico es ECOPETROL en las refinerías de Cartagena, Barrancabermeja y Apiay. A continuación se presenta un reporte suministrado por esta compañía en el que se muestran algunas de las propiedades de los cementos asfálticos producidos en el país.

Cuadro 6.20. Propiedades del cemento asfáltico de Barrancabermeja.

Refinería de Barrancabermeja				
Asfalto 70/90				
Propiedad	**Método ASTM**	**Unidad**	**Máx.**	**Min.**
Penetración a 25 ºC, 100 g, 5s	D 5	mm/10	70	90
Punto de ablandamiento	D 36	ºC (ºF)	42 (108)	53 (127)
Punto de inflamación	D 92	ºC (ºF)	232 (450)	

Fuente: ECOPETROL, www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/productos.htm

Cuadro 6.21. Propiedades del cemento asfáltico de Cartagena y Apiay.

Refinerías de Cartagena y de Apiay				
Asfalto 60/80				
Propiedad	**Método ASTM**	**Unidad**	**Máx.**	**Min.**
Penetración a 25 ºC, 100 g, 5s	D 5	mm/10	60	80
Ductilidad a 25ºC 5 cm/min	D 113	Cm	100	
Solubilidad en tricloroetileno	D 2042	% masa	99	
Punto de ablandamiento	D 36	ºC (ºF)	45 (113)	55 (131)
Punto de inflamación	D 92	ºC (ºF)	232 (450)	

Fuente: ECOPETROL, www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/productos.htm

Es de observar que la clasificación de los ligantes presentada por ECOPETROL es diferente a la especificada por el Instituto Nacional de Vías en el aparte 400.2.2 referente al cemento asfáltico, y a la especificada por el IDU en el aparte D.2.4.1.1 referente a asfaltos puros.

6.1.2.1 Especificaciones INVIAS. De acuerdo a las especificaciones del INVIAS en el Artículo 400-96, el cual trata "Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación y liga, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas densas y abiertas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos" en el aparte 400.2.2 de Cemento asfáltico, las especificaciones para el cemento asfáltico son las siguientes:

"El cemento asfáltico a emplear en los riegos de liga y en las mezclas asfálticas elaboradas en caliente será de penetración 60-70 u 80-100, según las características climáticas de la región y las condiciones de operación de la vía. Tal como lo indica la Tabla 400.2".

Cuadro 6.22. Tipo de cemento asfáltico por emplear en mezclas en caliente.

Tránsito de diseño 10^6 ejes de 80 kN	Temperatura media anual de la región		
	24 ºC +	15-24 ºC	15 ºC
5 +	60-70	60-70	80-100
0.5 a 5	60-70	60-70 u 80-100	80-100
0.5 -	60-70	60-70 u 80-100	80-100

Fuente: Tabla 400.2, Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS.

Cuadro 6.23. Especificaciones del cemento asfáltico.

CARACTERISTICA		Norma de ensayo INV	60-70		80-100	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
Penetración (25 ºC, 100 g, 5 s)	0.1 mm	E-706	60	70	80	100
Índice de penetración	-	E-724	-1	+1	-1	+1
Pérdida por calentamiento en película delgada (163 ºC, 5h)	%	E-721	-	1.0	-	1.0
Ductilidad (25 ºC, 5 cm/min)	cm	E-702	100	-	100	-
Penetración del residuo luego de la pérdida por calentamiento en película delgada, % de la penetración original	%		52	-	48	-
Solubilidad en tricloroetileno	%	E-713	99	-	99	-
Contenido de agua	%	E-704	-	0.2	-	0.2

Fuente: Tabla 400.3, Especificaciones generales de construcción de carreteras, INVIAS.

"Los requisitos de calidad del cemento asfáltico son los que establece la tabla 400.3. El cemento asfáltico podrá modificarse mediante la adición de activantes, rejuvenecedores, polímeros, asfaltos naturales o cualquier otro producto sancionado por la experiencia. En tales casos, las especificaciones particulares establecerán el tipo de adición y las especificaciones que deberán cumplir tanto el ligante modificado como las mezclas asfálticas resultantes. La dosificación y dispersión homogénea del producto de adición deberán tener la aprobación del Interventor".

6.1.2.2 Cemento asfáltico utilizado. Para esta investigación se decidió trabajar en el proceso seco con cemento asfáltico de Barrancabermeja en tanto que para el proceso húmedo se decidió trabajar tanto con cemento asfáltico de Barrancabermeja como de Apiay con el fin de estudiar las modificaciones que el caucho produciría a los mismos al ser mezclados.

6.1.2.3 Ensayos realizados. Tanto el cemento asfáltico de Apiay como de Barrancabermeja se sometieron a procesos de envejecimiento en el horno giratorio de película delgada RTFO y en la cámara de envejecimiento a presión PAV para determinar el cambio en las propiedades del asfalto durante el procedimiento convencional de mezclado en caliente, y el envejecimiento por oxidación del ligante durante la vida útil o de servicio del pavimento.

- Ensayo de cromatografía líquida en columna SARA, con el fin de determinar la composición del cemento asfáltico y su variación por envejecimiento. Este método de ensayo separa el asfalto en cuatro fracciones bien definidas, estas son: Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos.
- Curva reológica, para determinar la variación de la viscosidad con la temperatura.
- Medición de propiedades reológicas o caracterización viscoelástica mediante el Reómetro de Corte Dinámico, para determina el Módulo viscoelástico o complejo y

el ángulo de fase, o bien sea la componente viscosa y la componente elástica del cemento asfáltico.

- Ductilidad.
- Penetración.
- Punto de ablandamiento.
- Densidad.

Para el cemento asfáltico y las mezclas asfalto-caucho envejecidas en el PAV se les realizó el ensayo de Reómetro de Viga a Flexión (BBR), con el fin de medir la rigidez a la fluencia del asfalto a bajas temperaturas, este parámetro es un indicador de cómo el ligante resiste una carga constante, y el valor-m, que mide la capacidad de relajación de esfuerzos. Los ensayos de viscosidad Brookfield, reómetro de corte dinámico y reómetro de viga a flexión son útiles para calcular el grado PG del ligante.

La determinación del grado PG para los ligantes de Apiay y Barrancabermeja se presenta en el aparte 9.3.7.

6.1.2.3.1 Separación del cemento asfáltico en cuatro fracciones – SARA. El cemento asfáltico es una mezcla compleja de moléculas orgánicas que varía en su composición química y peso molecular. Como este es extraído del petróleo crudo, el cual presenta una gran variabilidad en su composición de acuerdo a su origen, es difícil determinar de manera precisa la composición del cemento asfáltico. A pesar de su complejidad se estableció un método para separarlo en cuatro grandes grupos, denominados Asfaltenos, Resinas, Aromáticos y Saturados.

Los Asfaltenos son sólidos amorfos, de color negro o café. Estos son altamente polares, materiales complejos de alto peso molecular (entre 1.000 y 100.000). Dentro de un medio tienen la tendencia de asociarse para formar micelas con un peso molecular entre 20.000 y

1.000.000.[7] Los Asfaltenos normalmente hacen parte entre el 5% al 25% del cemento asfáltico. El incremento de Asfaltenos produce endurecimiento, aumento en la viscosidad, y disminución de la susceptibilidad.

Las Resinas son sólidos o semisólidos de color café oscuro, moléculas de alta polaridad que hacen parte entre el 5% y 30% del cemento asfáltico. La alta polaridad hace a las Resinas muy adhesivas. Sus moléculas tienen un peso molecular entre 500 y 500.000[8]. Actúan como un agente peptónico para los Asfaltenos, disminuyendo el tamaño de las micelas y por lo tanto incrementando la fluidez del cemento asfáltico.[9]

Los Aromáticos tienen el peso moléculas más bajo, entre 300 y 2.000, y hacen parte de la mayor proporción del cemento asfáltico, entre el 40% y el 65%. Tienen una polaridad muy baja y forman un líquido viscoso café oscuro que actúa como medio de dispersión para los Asfaltenos.[10]

Los Saturados son moléculas de hidrocarbonos alifáticos en ramas-cadenas rectas. Estos tienen un peso molecular entre 300 y 20.000 y hacen parte entre el 5% al 20% del cemento asfáltico.[11]

Las Resinas, Aromáticos y Saturados hacen parte de la fracción de maltenos del cemento asfáltico.

El cemento asfáltico es un compuesto orgánico, el cual es líquido a altas temperaturas y se difundirá dentro de las partículas de caucho a una razón determinada por su temperatura, viscosidad y composición molecular. A través del mejoramiento del cemento asfáltico con

[7] SINGLESTON, T. M. *et al*. Residual bitumen characteristics following dry process rubber-bitumen interaction. En : ASPHALT RUBBER 2000. (1° : 2000 : Vilamoura). Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference. Braga : Barbosa & Xavier, 2000. p. 465.
[8] Ibid., p 465.
[9] Ibid., p 465.
[10] Ibid., p 466.
[11] Ibid., p 466.

polímeros, Vonk y Bull[12] descubrieron que cuando el caucho es adicionado al cemento asfáltico, los elastómeros absorben parte de los Maltenos dejando a un lado los Asfaltenos. Esto indica que cuando se adiciona caucho reciclado al cemento asfáltico, este absorbe parte de los maltenos dejando el cemento asfáltico residual con una alta proporción de Asfaltenos.

La composición química del cemento asfáltico analizada en estas cuatro fracciones nos permite establecer mediante el Índice de inestabilidad coloidal. El ligante se puede clasificar en tres estados, así:

- Tipo sol: clasifica al ligante como muy blando, la fracción de Asfaltenos es pequeña comparada con la de Maltenos, es típico en ligantes no envejecidos.
- Tipo sol-gel: es el estado apropiado del ligante en los pavimentos.
- Tipo gel: en este estado el ligante es muy duro, tiene baja capacidad cohesiva y no garantiza la durabilidad de la mezcla asfáltica.

El índice de inestabilidad coloidal se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Índice de inestabilidad coloidal} = \frac{\text{Saturados} + \text{Asfaltenos}}{\text{Aromáticos} + \text{Resinas}} \qquad \textbf{Ecuación 6.1}$$

A continuación se presenta en tanto por ciento la composición del cemento asfáltico en estado original, envejecido en RTFO y envejecido en PAV. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 4124-91.

[12] VONK, W. C. y BULL, A. L.. Phase phenomena and concentration effects in blends of bitumen and cariflex TR. En : Intl Roofing Congress (7° : 1989 : Munich).

Cuadro 6.24. Resultados del ensayo de Cromatografía líquida en columna -SARA- para el ligante sin modificar.

Código	Referencia	Saturados	Aromáticos	Resinas	Asfaltenos	Índice Coloidal
A	Original	22.0	34.6	30.9	12.5	0.53
	RTFO	23.3	36.0	24.6	16.1	0.65
	PAV	22.1	33.3	20.3	24.3	0.87
B	Original	27.9	32.4	29.7	9.9	0.61
	RTFO	21.0	36.0	29.3	13.8	0.53
	PAV	22.6	31.9	24.4	21.1	0.78

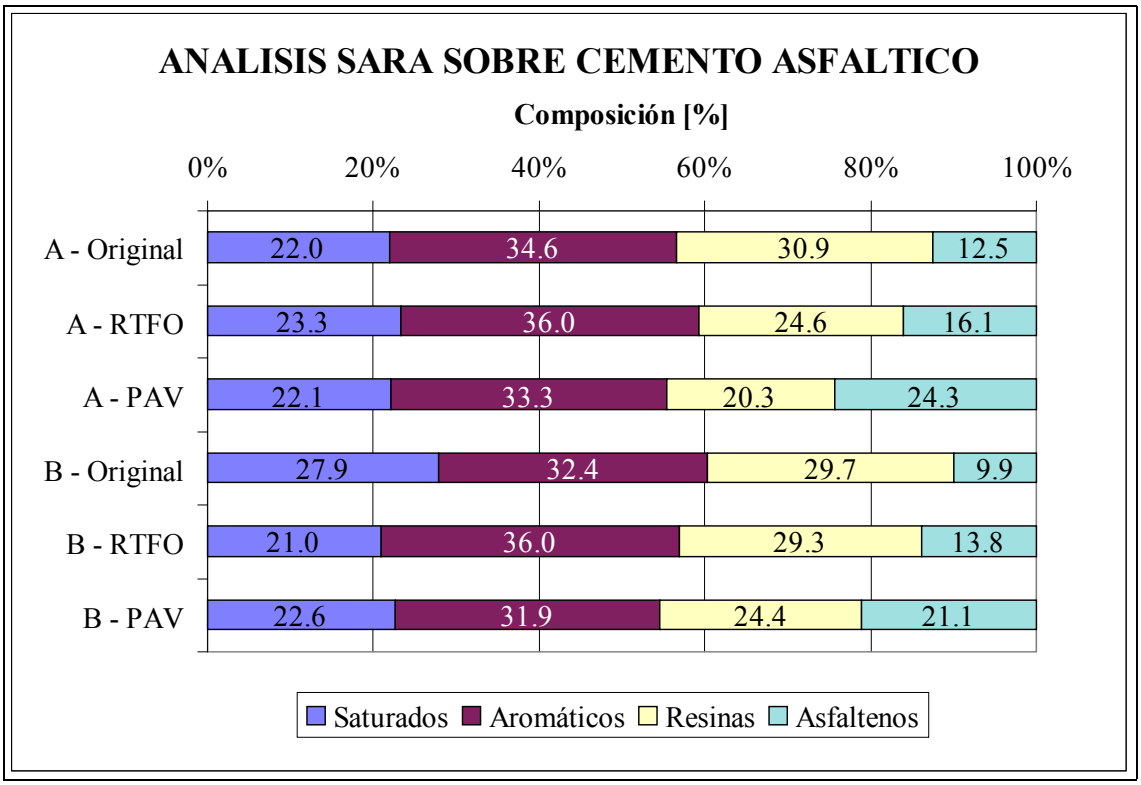


Figura 6.6. Variación de las fracciones del cemento asfáltico no modificado producto del envejecimiento.

En el anterior gráfico se puede observar un aumento en la proporción de Asfaltenos (fase dispersa) en el ligante después de haberlo sometido a los procesos de envejecimiento en el RTFO y PAV, esto hace que los Maltenos (fase dispersante) disminuya ocasionado endurecimiento del cemento asfáltico. Por otro lado, de acuerdo al intervalo de proporciones en el que según Singleston se deben encontrar estas fracciones, podemos ver

que los Asfaltenos se encuentran dentro de él y en su mayor parte las Resinas, sin embargo el contenido de Saturados es alto y el de Aromáticos es mas bien bajo.

Fotografía 6.1. Ensayo SARA en cromatografía líquida de columna.

6.1.2.3.2 Curva reológica del cemento asfáltico. La curva reológica ilustra la relación entre la viscosidad y la temperatura del cemento asfáltico. A medida que se incrementa la temperatura en el cemento asfáltico disminuye la viscosidad. Esta curva es de gran importancia ya que de ella se pueden obtener las temperaturas de bombeo y mezclado del ligante. La temperatura de mezclado del cemento asfáltico con los agregados depende de la granulometría de los mismos, así para mezclas densas se recomienda entre 150 y 190 cP y para mezclas drenantes (mezclas asfálticas con contenidos de vacíos con aire mayor al 20

por ciento) entre 700 y 900 cP. Para compactación en laboratorio de mezclas asfálticas densas, la viscosidad se recomienda entre 250 y 310 cP. La curva reológica se construyó con valores de viscosidad Brookfield y temperaturas que van desde 90 °C hasta 160°C.

A continuación se presentan los valores de viscosidad para los dos cementos asfálticos sin modificar, tanto en su estado original como envejecido en RTFO y PAV. Estos valores de viscosidad corresponden al promedio de las tres últimas lecturas obtenidas cada minuto y después de haber permitido que el ligante se estabilizara térmicamente durante diez minutos. Este ensayo se realizó según la norma ASTM D 4402-87.

Cuadro 6.25. Resultados de viscosidad Brookfield para el cemento asfáltico de Apiay.

Temperatura [°C]		**90**	**120**	**140**	**160**
Código	**Referencia**	Viscosidad Brookfield [cP]			
A	Original	4000	600	240	100
	RTFO	10200	1250	400	175
	PAV	64800	7200	2000	600

Cuadro 6.26. Resultados de viscosidad Brookfield para el cemento asfáltico de Barrancabermeja.

Temperatura [°C]		**90**	**120**	**140**	**160**
Código	**Referencia**	Viscosidad Brookfield [cP]			
B	Original	3800	580	220	95
	RTFO	9800	1230	410	190
	PAV	84600	8600	2200	800

En los dos gráficos siguientes se puede observar que el ligante en su proceso de envejecimiento, ya sea en planta o durante su vida útil, aumenta su viscosidad, lo que se traduce en un endurecimiento del mismo.

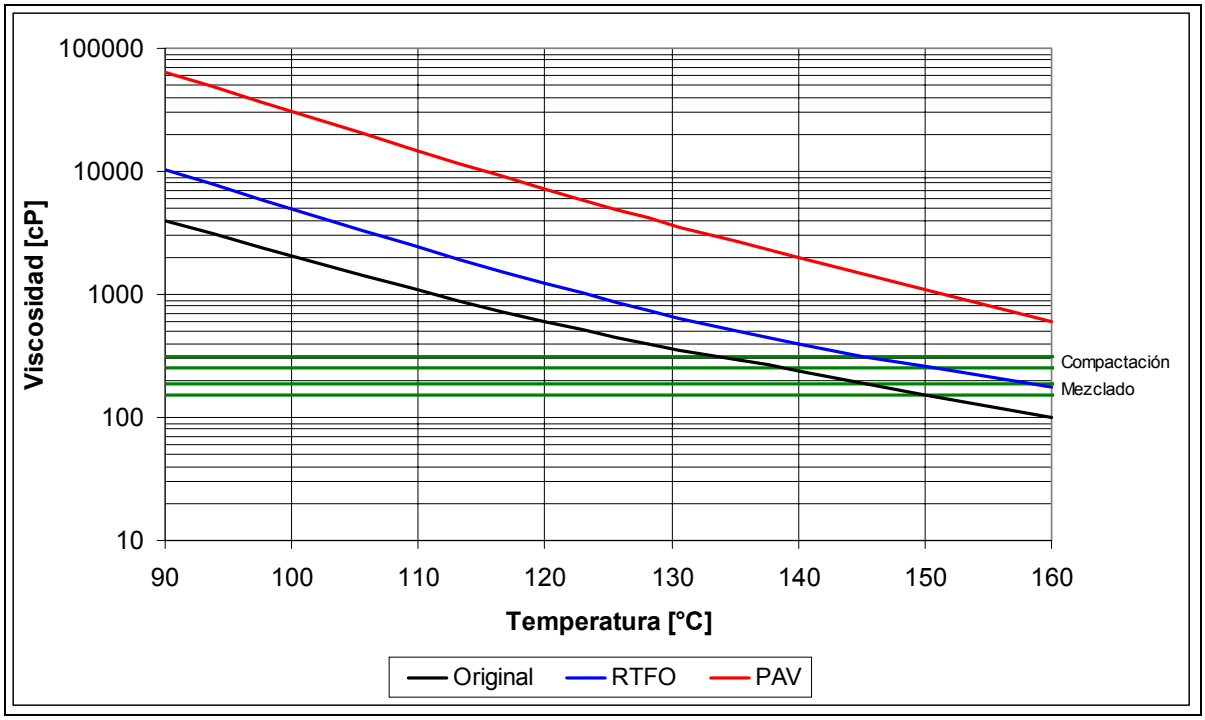


Figura 6.7. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el cemento asfáltico de Apiay.

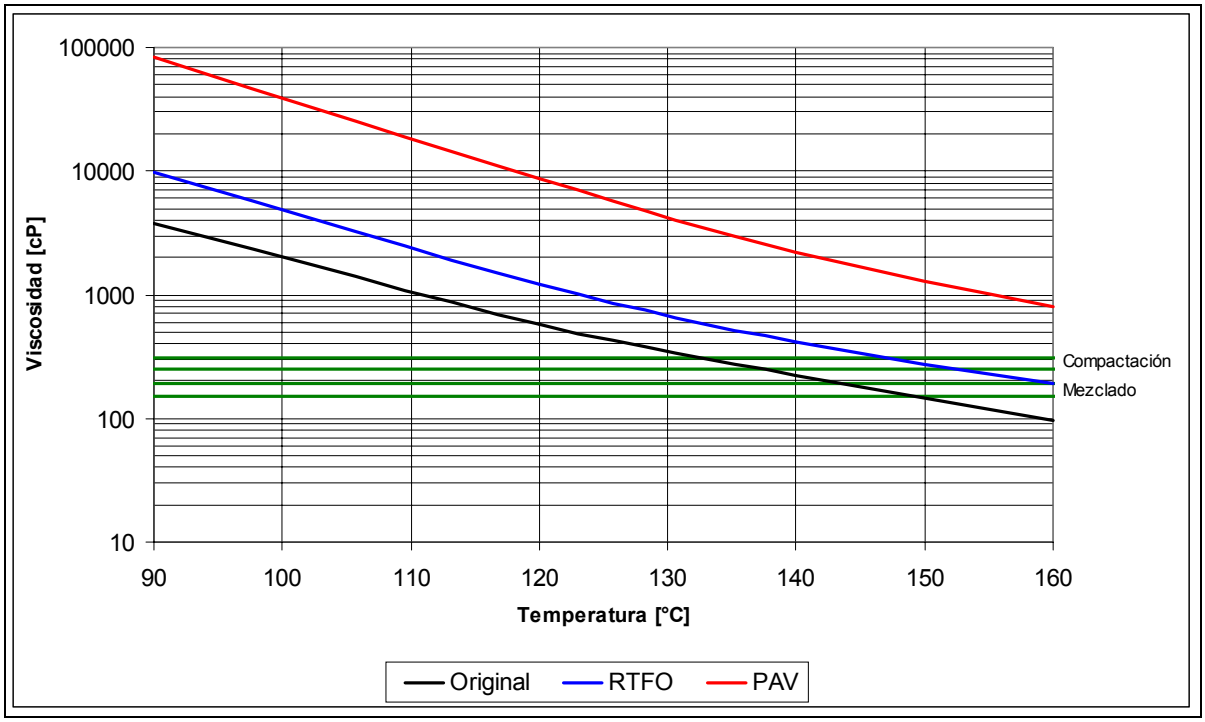


Figura 6.8. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el cemento asfáltico de Barrancabermeja.

Se puede concluir que la temperatura de mezclado para el cemento asfáltico de Apiay está entre 145°C y 150°C, y para Barrancabermeja entre 144°C y 149°C, mientras que las de compactación en laboratorio están entre 133°C y 138°C, y 144°C y 149°C respectivamente.

6.1.2.3.3 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de corte dinámico – DSR.

El DSR es un equipo usado para realizar un ensayo Dinámico Oscilatorio que describe las propiedades viscoelásticas del cemento asfáltico sobre un intervalo de temperaturas y tiempo o frecuencia de carga. Durante el ensayo se aplica un esfuerzo o deformación cortante sinusoidal a una muestra de cemento asfáltico confinada entre dos discos paralelos. El resultado del corte o la deformación cortante sinusoidal es monitoreado como una función de la temperatura y la frecuencia de ensayo. Basado en las mediciones de estos esfuerzos o deformaciones se pueden determinar los módulos dinámicos, la rigidez y la viscosidad que presenta un cemento asfáltico a diferentes temperaturas, frecuencias y niveles de deformación.

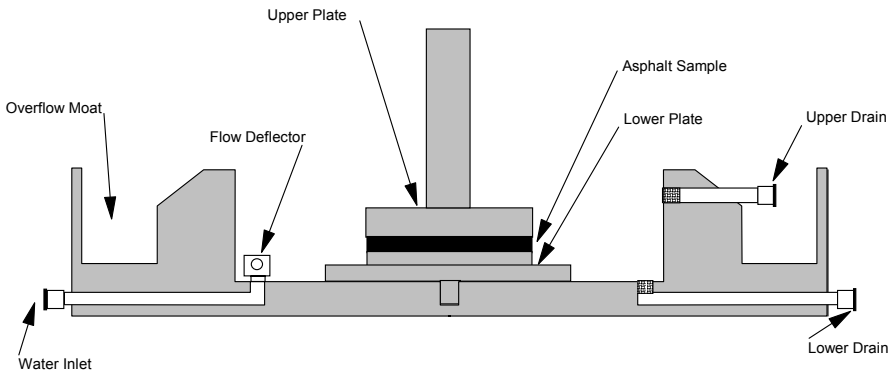


Figura 6.9. Esquema del equipo DSR. Tomado de CSA 100/500 Asphalt Rheometer Manual.

La principal medición reológica obtenida con el DSR es el módulo complejo |G*|, el cual es la relación entre el máximo esfuerzo cortante (τmax) y la máxima deformación por corte (γmax). Este representa la rigidez del cemento asfáltico bajo las condiciones de ensayo. El ángulo de fase, definido como la diferencia de fase ó desfase entre los picos ó máximos del

esfuerzo y la deformación, representa el tiempo de retardo desde que se aplica el esfuerzo hasta cuando el material responde, con valores límites de 0° cuando es un comportamiento puramente elástico y 90° cuando es puramente viscoso. En un material con un alto ángulo de fase prevalece una respuesta viscosa, mientras que en un material con un bajo ángulo de fase predomina una respuesta elástica. La configuración del DSR mostrada en la Figura 6.10 muestra dos discos que están sumergidos en un baño de agua al que se le controla la temperatura. El disco superior oscila de forma sinusoidal con respecto al disco inferior en arco desde el punto A hasta B y luego a C pasando por A y desde C regresando nuevamente al punto A para generar un esfuerzo o una deformación sinusoidal.

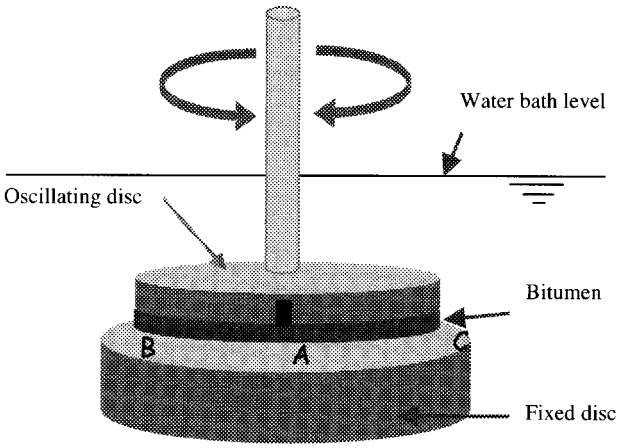
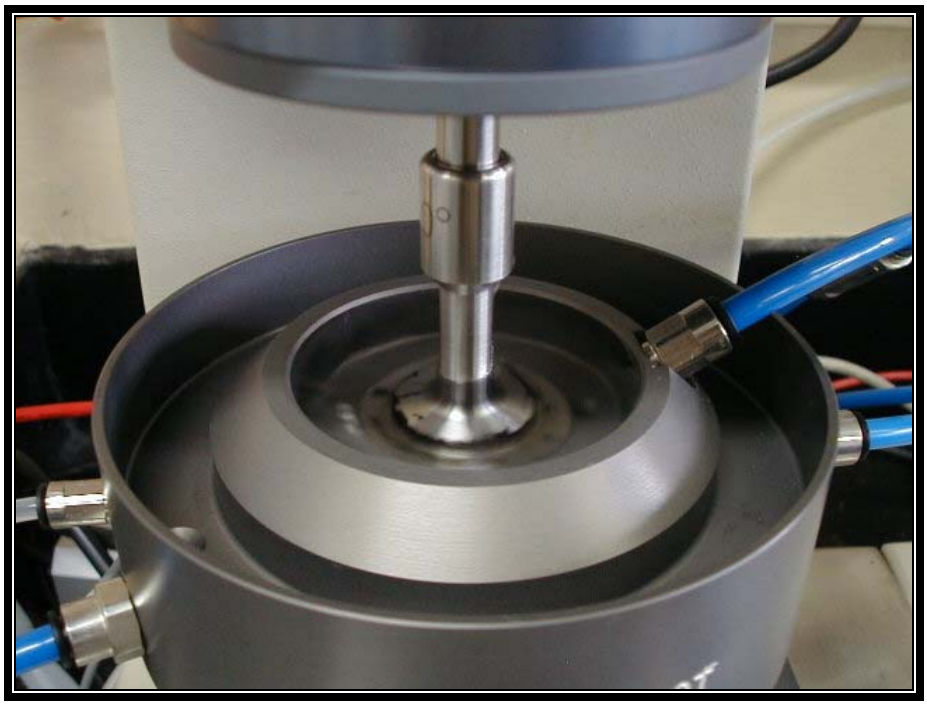


Figura 6.10. Esquema del funcionamiento del DSR. Tomado de: Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference.

Para realizar el ensayo se calienta la muestra asfáltica hasta una temperatura en la cual sea fácilmente vertida y colocada sobre el disco inferior, o previamente elaborada en moldes de silicona con las dimensiones apropiadas. Posteriormente el disco superior baja hasta el inferior una altura determinada logrando que se comprima la muestra, quedando algo de exceso fuera de los discos. Los bordes de la muestra deben ser pulidos hasta dejarlos alineados con los discos. Por último el disco superior termina de bajar hasta una altura establecida por la norma quedando los bordes de la muestra un poco ovalados.

De acuerdo con la norma AASHTO TP5-98, para cementos asfálticos originales y residuos del RTFO se utiliza el disco de 25 mm y la separación entre discos debe ser de 1 mm. Para el residuo del PAV se debe utilizar un disco de 8 mm y separación entre discos de 2 mm.



Fotografía 6.2. Ensayo de DSR, disco de 25 mm.

De acuerdo a la metodología Superpave, en un ligante original se evalúa la relación G*/senoδ como parámetro de control de la deformación permanente. Este mecanismo de falla ocurre en la vida temprana del pavimento, original o no envejecido, y es más crítico a altas temperaturas. Un ligante más rígido y más elástico resistirá más la deformación permanente. El parámetro G*/senoδ debe ser como mínimo 1kPa para ligantes originales y 2.2 kPa para ligantes envejecidos en RTFO. Para un ligante envejecido en PAV se evalúa la relación G*senoδ como parámetro de control de fatiga. Este mecanismo de falla ocurre tarde en la vida del pavimento, y es más crítico a temperaturas intermedias. El parámetro G*senoδ debe ser como máximo 5000 kPa. Un ligante menos rígido y más elástico será más resistente a la fatiga.

Cuadro 6.27. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja originales.

Parámetro	Temperatura	Apiay	Barrancabermeja
δ [grados]	58°C	87.1	84.0
G*/senoδ [kPa]		1.65	1.47
δ [grados]	64°C	88.2	85.8
G*/senoδ [kPa]		0.79	0.74

Cuadro 6.28. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del RTFO.

Parámetro	Temperatura	Apiay	Barrancabermeja
δ [grados]	64°C	78.5	84.6
G*/senoδ [kPa]		3.97	3.07
δ [grados]	70°C	81.3	86.5
G*/senoδ [kPa]		1.83	1.24

Cuadro 6.29. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del PAV.

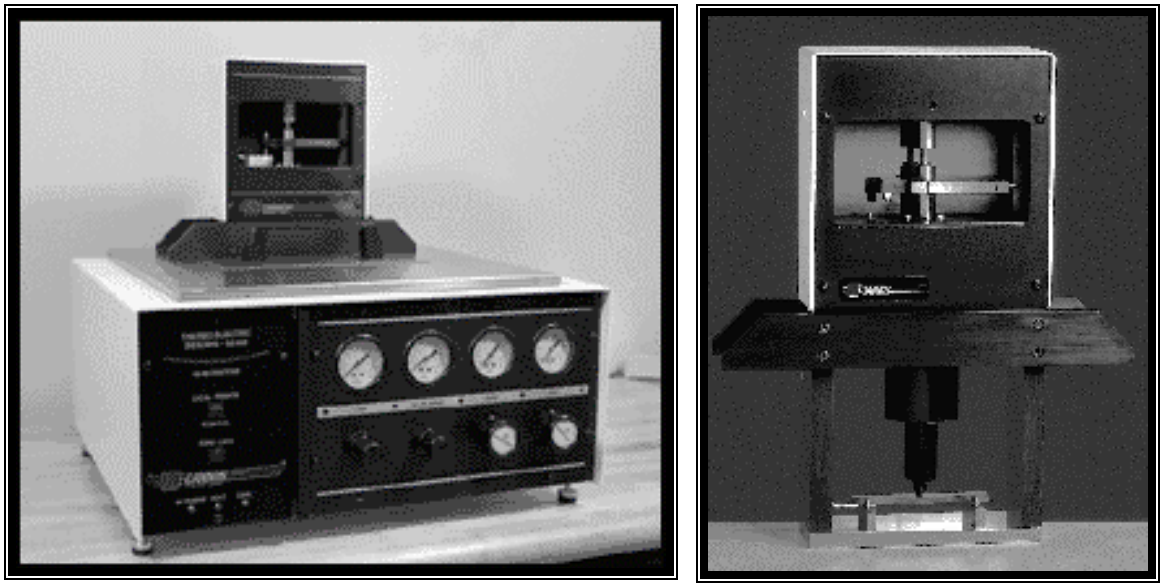
Parámetro	Temperatura	Apiay	Barrancabermeja
G*senoδ[kPa]	31°C	1278.5	1684.7
	28°C	1987.8	2607.9
	25°C	2984.7	3985.2
	22°C	3816.8	5795.3
	19°C	6037.0	-

Los valores señalados con azul corresponden a las temperaturas a las cuales el cemento asfáltico cumple con los parámetros especificados por Superpave al ser ensayados en el reómetro de corte dinámico, y servirán para calcular el grado de desempeño del ligante, análisis que se presenta en el numeral 6.3.7.

6.1.2.3.4 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de viga a flexión – BBR. Debido a la alta rigidez que presentan el cemento asfáltico a bajas temperaturas, la mayoría de los reómetros de corte dinámico con platos paralelos no pueden ser usados para medir esta propiedad en forma confiable. Es por esto que SHRP desarrolló un nuevo ensayo para

medir con precisión la rigidez y la velocidad de deformación de los ligantes a bajas temperaturas que llegan a ser representativas en los pavimentos. Este ensayo se vale de la teoría de vigas para medir la rigidez de una pequeña viga de cemento asfáltico simplemente apoyada, bajo carga de creep para simular los esfuerzos que gradualmente se producen en un pavimento al bajar la temperatura. Se evalúan dos parámetros, la rigidez a la fluencia, y el valor-m, que mide la variación de la rigidez del asfalto al aplicársele cargas.

El reómetro de viga a flexión, o BBR, es un dispositivo sencillo que mide la deflexión de un ligante bajo carga constante a una temperatura correspondiente a la más baja de un pavimento en servicio, en donde el cemento asfáltico se comporta más como un sólido elástico.



Fotografía 6.3. Reómetro de viga a flexión BBR.

El ensayo consiste en cargar una viga de cemento asfáltico durante cuatro minutos con una carga constante y midiéndose su deformación en forma continua; de esta forma pueden ser medidas y calculadas la rigidez a la fluencia y la variación de la rigidez en función del tiempo. La viga de cemento asfáltico tiene 125 mm de largo, 6.25 mm de ancho y 12.5 mm de altura.

Este ensayo se realizó en los laboratorios de TexPar Energy inc, en Claremore Estados Unidos, siguiendo la norma AASHTO TP1-98.

De acuerdo a la metodología Superpave, en un ligante después de ser envejecido en la cámara a presión PAV se evalúan la rigidez a la fluencia y el valor-m a los 60 s como parámetro de control de fisuramiento térmico. Para controlar este mecanismo de falla, la máxima rigidez a la fluencia es de 300 MPa y el mínimo valor-m es de 0.30.

Si la rigidez a la fluencia a los 60 segundos llega a ser mayor de 300 MPa y el valor-m se conserva por debajo de 0.30 se requerirá realizar el ensayo de Tensión Directa DT, el cual no se tratará en este documento ya que todos los ligantes ensayados cumplieron con los parámetros del BBR.

Cuadro 6.30. Resultados de caracterización viscoelástica en el BBR para los cementos asfálticos de Apiay y Barrancabermeja después del PAV.

Parámetro	Temperatura	Apiay	Barrancabermeja
s(t) MPa	-12°C	171.5	140.0
m(t)		0.325	0.300
s(t) Mpa	-18°C	320.0	486.0
m(t)		0.288	0.227

Para prevenir el fisuramiento térmico se requiere que el ligante sea menos rígido y que tenga alta capacidad de relajación de esfuerzos. Un valor bajo de s(t) indica baja acumulación de esfuerzos, y un valor alto de m(t) una mayor relajación de esfuerzos. Un ligante debe ser menos elástico para tener una mejor relajación de esfuerzos.

6.1.2.3.5 Ensayos Convencionales. Se consideran como ensayos convencionales realizados al cemento asfáltico los siguientes: ductilidad, penetración, punto de ablandamiento y densidad. Así mismo se calculó la perdida de masa después del ensayo de envejecimiento en el horno rotatorio de película delgada.

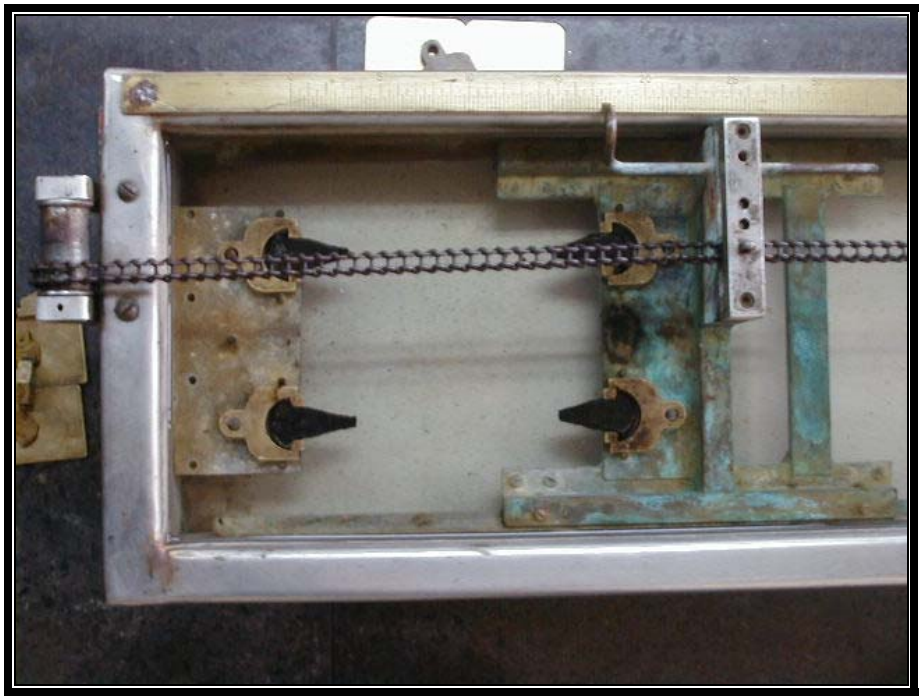
Cuadro 6.31. Resultados de ensayos convencionales a cemento asfáltico no modificado.

Código	Ductilidad [25ºC]	Recuperación elástica [25ºC, 50 mm/min, 20 cm]	Penetración [25ºC, 100 g, 5 s]	Punto de ablandamiento	Densidad [25ºC]	Pérdida de masa
	INV E-702	ASTM T-301-95	INV E-706	INV E-712	INV E-707	INV E-720
	[cm]	[%]	[1/10 mm]	[ºC]	[g/cm³]	[%]
Cemento asfáltico Original						
A-13-165-55	> 100	6.25	65	51.0	1.02	-
B-15-155-50	> 100	5.00	71	44.8	1.02	-
Cemento asfáltico envejecido en RTFO						
A-13-165-55	48.50	-	45	51.7	0.97	1.14
B-15-155-50	> 100	-	54	48.8	1.03	1.00
Cemento asfáltico envejecido en PAV						
A-13-165-55	9.90	-	38	62.3	0.89	-
B-15-155-50	7.75	-	18	66.9	0.99	-

El ensayo de recuperación elástica se realizó en los laboratorios de TexPar Energy inc, en Claremore Estados Unidos.

De acuerdo a las especificaciones del INVIAS para el cemento asfáltico, ambos ligantes cumplen con la penetración tanto en su estado original como después del RTFO, sin embargo el cemento asfáltico de Apiay no cumple en el ensayo de pérdida de masa después del RTFO, en el que Barrancabermeja cumple con el valor máximo.

La ductilidad después del RTFO en el cemento asfáltico de Apiay se disminuye casi en dos tercios, mientras que para Barrancabermeja se disminuye en un tercio, y después del PAV en más de 90% para ambos ligantes. Esto es debido a que en los procesos de envejecimiento los ligantes se hacen menos viscosos por la pérdida de los componentes livianos, característica que se refleja también con la disminución en la penetración y el aumento en el punto de ablandamiento.



Fotografía 6.4. Ensayo de Ductilidad.

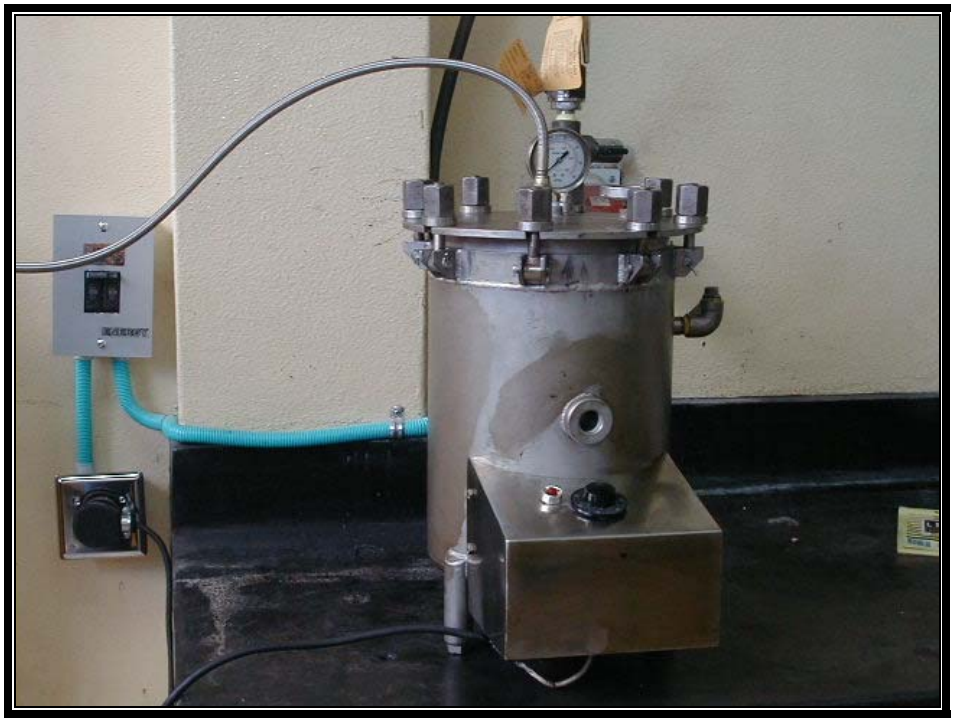
Fotografía 6.5. Ensayo de Densidad en cementos asfálticos.

Fotografía 6.6. Ensayo de Penetración en cementos asfálticos.

Fotografía 6.7. Ensayo de Punto de ablandamiento con anillo y bola al cemento asfáltico.

Fotografía 6.8. Ensayo de película delgada en horno rotatorio RTFO.

Fotografía 6.9. Botellas con cemento asfáltico después del ensayo de película delgada en horno rotatorio RTFO.



Fotografía 6.10. Cámara de envejecimiento a presión PAV.

Fotografía 6.11. Bandejas con cemento asfáltico después del ensayo de envejecimiento en la cámara a presión PAV.

6.2 PROCESO POR VÍA SECA

Este proceso se desarrolló para estudiar el efecto del caucho al ser adicionado como una porción de los agregados finos en la elaboración de las mezclas asfálticas. Se utilizaron dos husos granulométricos especificados por el INVÍAS, la MDC-1 y la MDC-2. Las granulometrías se modificaron con dos diferentes porcentajes de caucho, de 1% y 2% del peso total de los agregados. En estos ensayos el caucho adicionado fue remplazado por la misma fracción y cantidad de los agregados con el objeto de mantener la misma granulometría densa especificada.

6.2.1 Agregados. La granulometría de los agregados se escogió como tipo Densa con el fin de adaptar a este diseño las granulometrías establecidas por el INVIAS en el Artículo 450-96 para Mezcla Densa en Caliente (Concreto Asfáltico), de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Estas granulometrías se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 6.32. Granulometría de Agregados para Mezcla Densa en Caliente establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96.

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Normal	**Alterno**	**MDC-1**	**MDC-2**
25.0 mm	1”	100	-
19.0 mm	3/4”	80-100	100
12.5 mm	1/2”	67-85	80-100
9.5 mm	3/8”	60-77	70-88
4.75 mm	No. 4	43-54	51-68
2.00 mm	No. 10	29-45	38-52
425 µm	No. 40	14-25	17-28
180 µm	No. 80	8-17	8-17
74 µm	No. 200	4-8	4-8

Fuente: Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Artículo 450-96. p. 1.

Se trabajó con el punto medio de los intervalos de cada tamaño. Para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho se decidió reemplazar el porcentaje de caucho adicionado por la porción fina correspondiente de los agregados, con el fin de no alterar la granulometría establecida por el INVIAS. Las dos primeras curvas granulométricas que se presentan a continuación corresponden a la MDC-1 y MDC-2 escogidas, donde para cada una se muestran los límites de la granulometría propuestos por el INVIAS; seguida a estas se presentan las curvas granulométricas para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho, en las cuales la línea azul representa fracciones de agregados, y la línea roja fracciones combinadas de agregados y caucho.

Se puede observar que la distribución granulométrica de los diseños con caucho no se alteró o cambió respecto a las granulometrías iniciales MDC-1 y MDC-2.

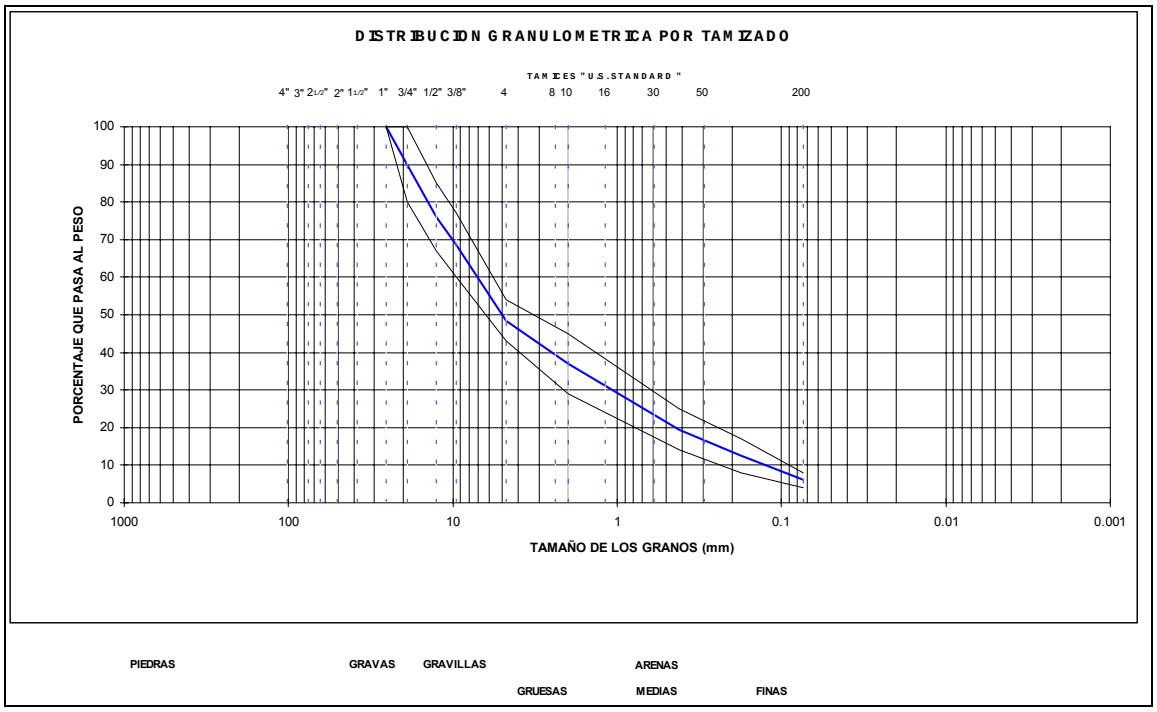


Figura 6.11. Curva granulométrica de los Agregados escogida y los límites para una Mezcla Densa en Caliente tipo 1 establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96.

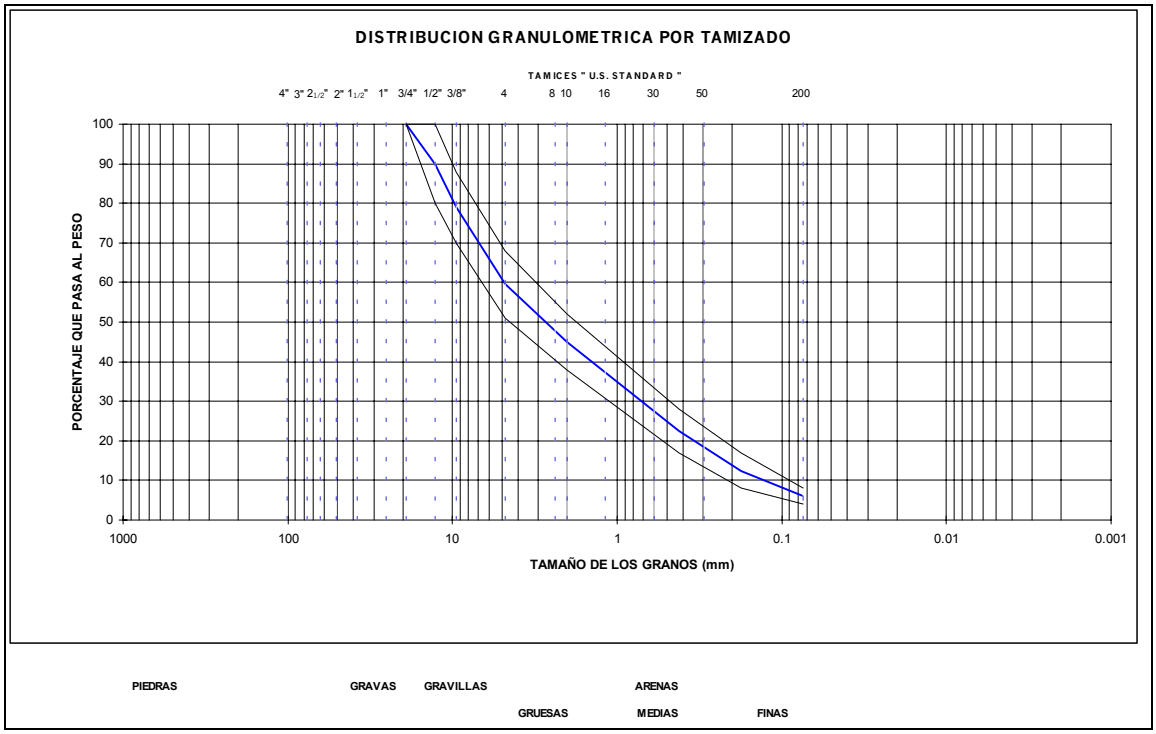


Figura 6.12. Curva granulométrica de los Agregados escogida y los límites para una Mezcla Densa en Caliente tipo 2 establecida por el INVIAS según el Artículo 450-96.

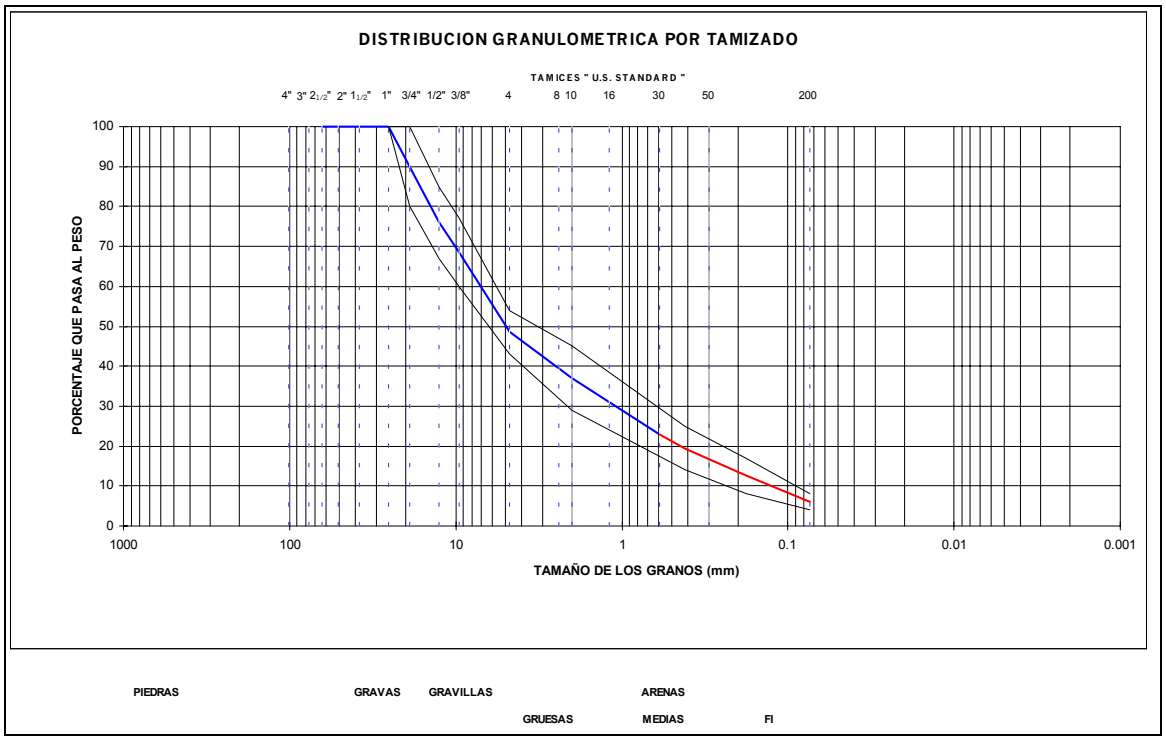


Figura 6.13. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-1 con 1% de caucho.

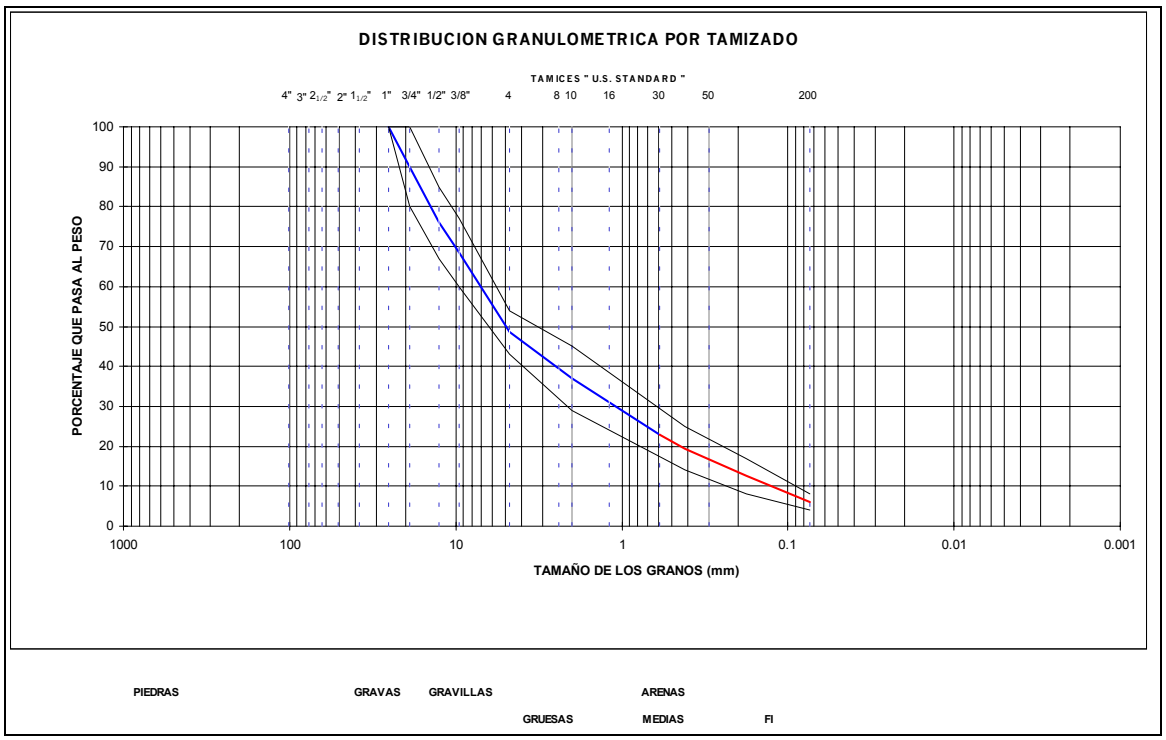


Figura 6.14. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-1 con 2% de caucho.

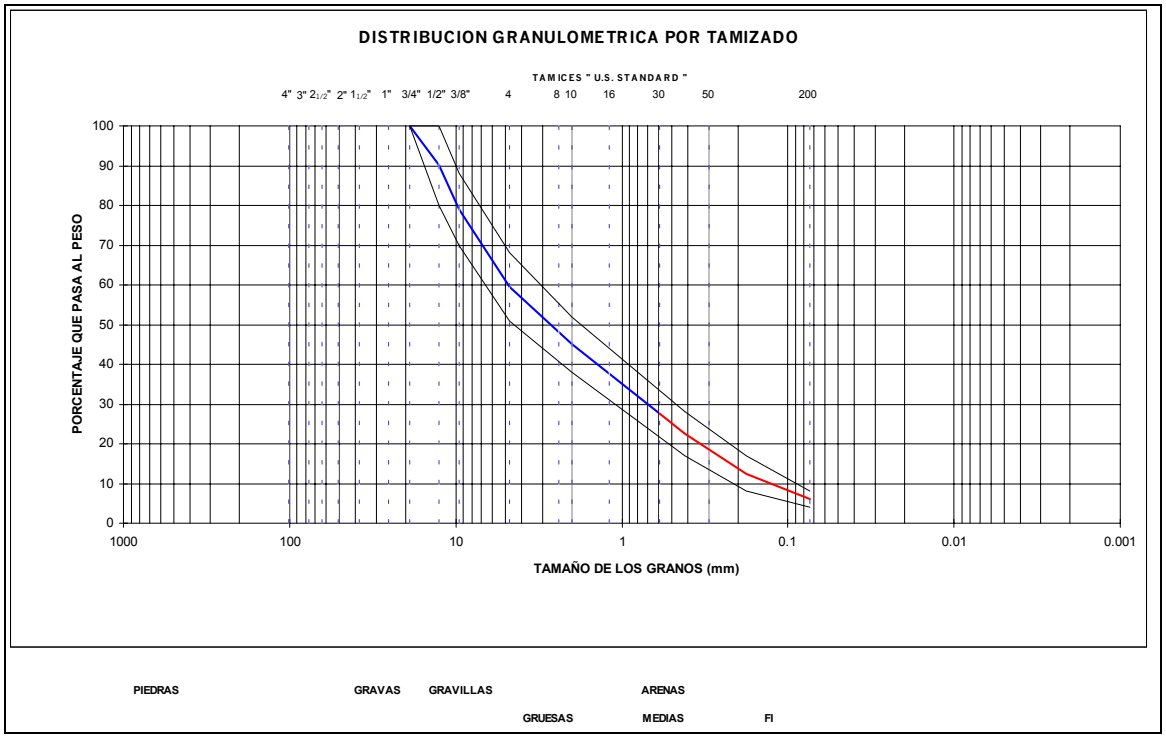


Figura 6.15. Curva granulométrica de los Agregados y caucho para el diseño MDC-2 con 1% de caucho.

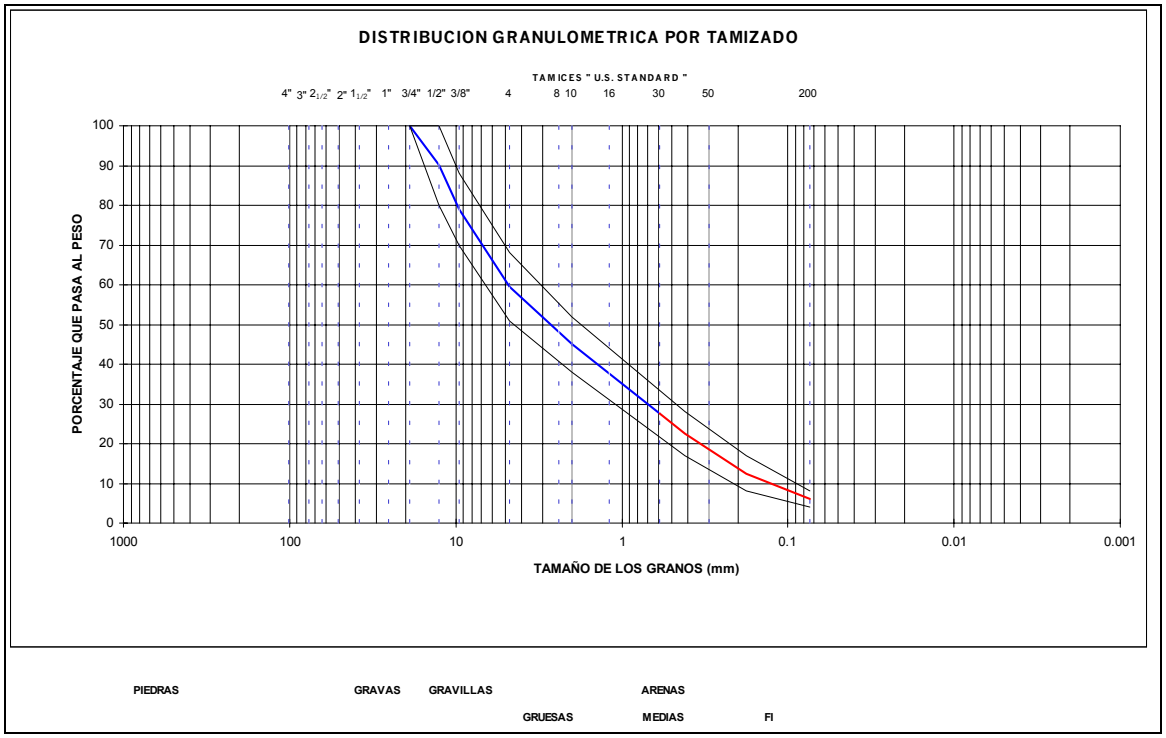


Figura 6.16. Curva granulométrica de Agregados y caucho para el diseño MDC-2 con 2% de caucho.

6.2.2 Granulometría del Caucho. La granulometría del caucho se escogió de acuerdo a la granulometría del caucho molido de llantas usadas suministrado por la firma Renovadora de Llantas Ltda, y de acuerdo a los tamaños de los agregados a utilizar; también se decidió trabajar con tamaños inferiores al tamiz No. 10 (2.00 mm), ya que la forma de las partículas superiores a este tamaño son alargadas debido al proceso de molienda usado y no son adecuadas para ser usadas en mezclas asfálticas.

El porcentaje de caucho usado en la vía seca es relativamente bajo, por lo general menos del 5%, y está relacionado con el peso de los agregados El porcentaje con el cual se trabajó fue de 1% y 2%. En el siguiente cuadro se presenta la granulometría del caucho utilizada.

Cuadro 6.33. Granulometría del Caucho suministrada por la firma Renovadora de Llantas Ltda.

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	
9.51 mm	3/8”	100.00
2.38 mm	No. 8	84.75
2.00 mm	No. 10	76.23
1.19 mm	No. 16	42.16
595 µm	No. 30	12.56
297 µm	No. 50	2.85
74 µm	No. 200	0.00

Cuadro 6.34. Granulometría del Caucho propuesta.

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	
595 mm	No. 30	100
425 µm	No. 40	21
180 µm	No. 80	2
74 µm	No. 200	0

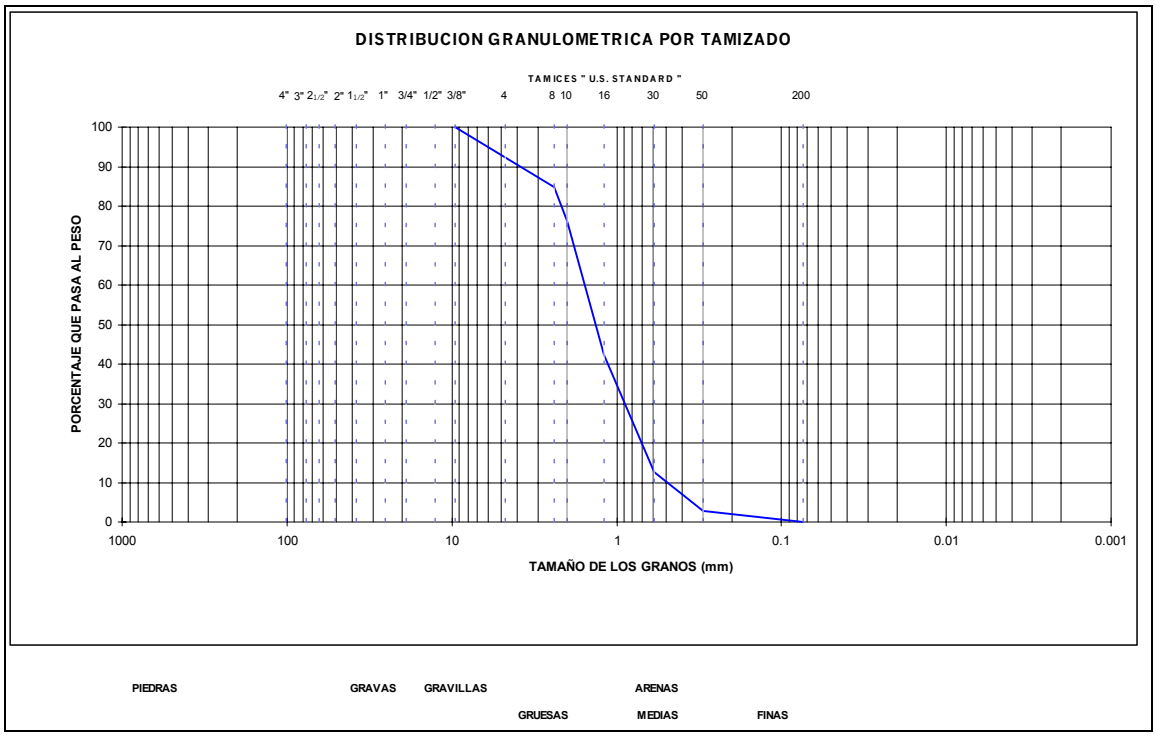


Figura 6.17. Curva granulométrica del caucho tal como es suministrada por la firma Renovadora de Llantas Ltda.

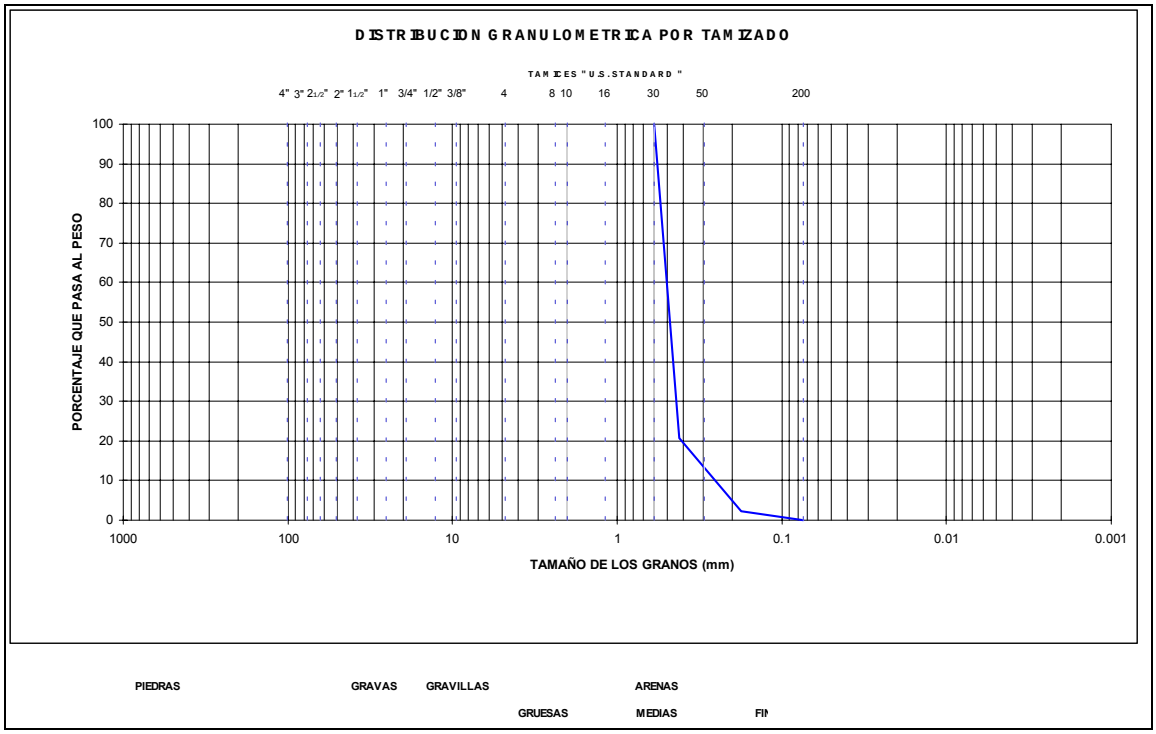


Figura 6.18. Curva granulométrica del caucho utilizada para ser incorporada a las mezclas asfálticas por medio de la vía seca.

6.2.3 Cantidad óptima de Cemento Asfáltico. La cantidad de cemento asfáltico requerida se determinó con el procedimiento Marshall mediante la elaboración de cuatro probetas con diferentes contenidos de ligante, evaluándose el contenido de vacíos con aire como parámetro principal, la Estabilidad y el Flujo Marshall.

6.2.4 Cantidad óptima de GCR. Una vez determinado el contenido óptimo de ligante en los dos tipos de mezclas asfálticas con los diferentes contenido de caucho, se procedió a buscar el contenido óptimo de GCR mediante evaluación dinámica con ensayos de deformación permanente, resistencia a la fatiga y módulos dinámicos.

6.2.5 Metodología. Se trabajó solo con asfalto de Barrancabermeja, y como se mencionó anteriormente, se incorporó el caucho en dos proporciones diferentes, de 1% y 2% del peso total de los agregados. Se decidió elaborar mezclas asfálticas convencionales, sin caucho, con el fin de comparar la variación de las propiedades mecánicas de las mismas al ser adicionado el GCR. De esta forma se obtuvieron seis diseños, dos sin caucho, y cuatro con caucho.

El proceso de elaboración de las mezclas será el mismo planteado por el método PlusRide, en el cual se establecen las temperaturas de los materiales antes de ser mezclados, así como tiempos y temperaturas de mezclado, entre otras condiciones especiales que se deben seguir para la elaboración en laboratorio de las mezclas asfálticas con caucho. Este procedimiento se presenta en el ANEXO B.

El proceso de laboratorio de la metodología Genérica se diferencia del propuesto por la metodología PlusRide en el número de golpes de compactación, 50 a 75 golpes para la metodología Genérica, y en que esta no requiere período de curado.

6.2.6 Ensayos realizados a las mezclas asfálticas convencionales y mejoradas con GCR. Para las mezclas asfálticas convencionales y las mejoradas con caucho se realizaron los siguientes ensayos:

- Diseño Marshall, para determinar la proporción óptima de cemento asfáltico.
- Compactación giratoria en la máquina de cizallamiento giratorio PCG, con el fin de elaborar las probetas para la evaluación de módulos dinámicos.
- Determinación del comportamiento a la fatiga.
- Determinación del Módulo Dinámico a 5, 25 y 40 ºC, y frecuencias de carga de 1, 4, 10 y 16 Hz.
- Determinación de la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo en laboratorio.

6.2.6.1 Diseño Marshall. El Método de Diseño Marshall permite obtener un contenido óptimo de cemento asfáltico para mezclas asfálticas en caliente. Los parámetros que se estudian durante el diseño son la Estabilidad y Flujo Marshall, vacíos de la mezcla asfáltica y vacíos en el Agregado Mineral. De acuerdo al criterio de diseño, la determinación del contenido óptimo de cemento asfáltico se basa principalmente en los vacíos con aire en la mezcla asfáltica, sin dejar de lado la evaluación de la Estabilidad y el Flujo Marshall.

Para la determinación del contenido óptimo de ligante en las mezclas asfálticas convencionales ó sin GCR, MDC-1 0% y MDC-2 0%, se elaboraron mezclas de referencia con cuatro contenidos diferentes de ligante siguiendo el método Marshall. Ya que se ha encontrado que el contenido óptimo de ligante en mezclas asfálticas con GCR está por encima del óptimo en las mezclas sin caucho, se partió del óptimo encontrado para los diseños MDC-1 0% y MDC-2 0% aumentando los contenidos de ligante, obteniendo así cuatro probetas con diferentes contenidos de cemento asfáltico para realizar el diseño Marshall.

Los criterios aplicados en la evaluación de las mezclas asfálticas diseñadas siguiendo el método Marshall fueron los especificados por el INVIAS en Las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Artículo 450-96, que trata sobre Mezcla Densa en Caliente (Concreto Asfáltico). Estos criterios se presentan en el siguiente cuadro.

Cuadro 6.35. Criterios para diseños de mezclas asfálticas en caliente según las especificaciones del INVIAS

Características	Tránsito de diseño (N) - Ejes equivalentes de 80 kN		
	> 5 x 10^6	5 x 10^5 - > 5 x 10^6	< 5 x 10^5
Compactación, golpes/cara	75	75	75
Estabilidad mínima [kg]	750	650	500
Flujo [mm]	2 – 3.5	2 – 4	2 – 4
Vacíos con aire:			
- Capa de rodadura	4 – 6	3 – 5	3 – 5
- Base asfáltica	4 – 8	3 – 8	3 – 8
Vacíos mínimos en agregados minerales			
- Granulometría MDC-1	14	14	14
- Granulometría MDC-2	15	15	15
- Granulometría MDC-3	16	16	16

Fuente: Instituto Nacional de Vías. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Artículo 450-96. p. 4.

Las diferentes probetas Marshall fueron elaboradas con 1200 g de peso, en moldes de 10.2 cm de diámetro, y con una energía de compactación de 75 golpes por cada cara. Se elaboraron tres probetas para cada contenido de asfalto, con el fin de descartar cualquier valor anómalo que pudiera presentarse, registrando el promedio de los resultados obtenidos.

Para los diseños MDC-1 sin caucho y con caucho se prepararon probetas con los siguientes contenidos de cemento asfáltico: 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% y 6.0%; y para los diseños MDC-2 sin caucho y con caucho contenidos de cemento asfáltico de 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% y 7.0%. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 1559–89.

A continuación se presentan los diferentes porcentajes de materiales calculados para cada uno de los diseños con diferentes contenidos de caucho, y para cada una de las probetas con diferentes contenidos de ligante.

Cuadro 6.36. Diseño Marshall MDC-1 0%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50
% Agregado	96.00	95.50	95.00	94.50	94.00	93.50
% GCR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 6.37. Diseño Marshall MDC-1 1%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	-
% Agregado	95.05	94.55	94.06	93.56	93.07	-
% GCR	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	-

Cuadro 6.38. Diseño Marshall MDC-1 2%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	-
% Agregado	94.12	93.63	93.14	92.65	92.16	-
% GCR	1.88	1.87	1.86	1.85	1.84	-

Cuadro 6.39. Diseño Marshall MDC-2 0%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00
% Agregado	95.50	95.00	94.50	94.00	93.50	93.00
% GCR	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cuadro 6.40. Diseño Marshall MDC-2 1%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	-
% Agregado	94.06	93.56	93.07	92.57	92.08	-
% GCR	0.94	0.94	0.93	0.93	0.92	-

Cuadro 6.41. Diseño Marshall MDC-2 2%.

Grupo No.	1	2	3	4	5	6
% Asfalto	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	-
% Agregado	93.14	92.65	92.16	91.67	91.18	-
% GCR	1.86	1.85	1.84	1.83	1.82	-

Fotografía 6.12. Ensayo Estabilidad y Flujo Marshall.

6.2.6.1.1 Vacíos con aire en la mezcla total. A continuación se presentan los resultados de vacíos con aire en la mezcla total para los diseños MDC-1 y MDC-2 en las mezclas sin caucho y mejoradas con caucho. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-735.

Cuadro 6.42. Resultados de Vacíos con aire en la mezcla total para los diseño MDC-1.

% de asfalto	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Código	% Vacíos con aire en la mezcla total					
MDC-1 0%	8.61	6.64	4.29	1.96	2.05	4.23
MDC-1 1%	18.42	13.51	9.13	5.86	3.81	-
MDC-1 2%	18.07	13.16	8.27	5.63	4.60	-

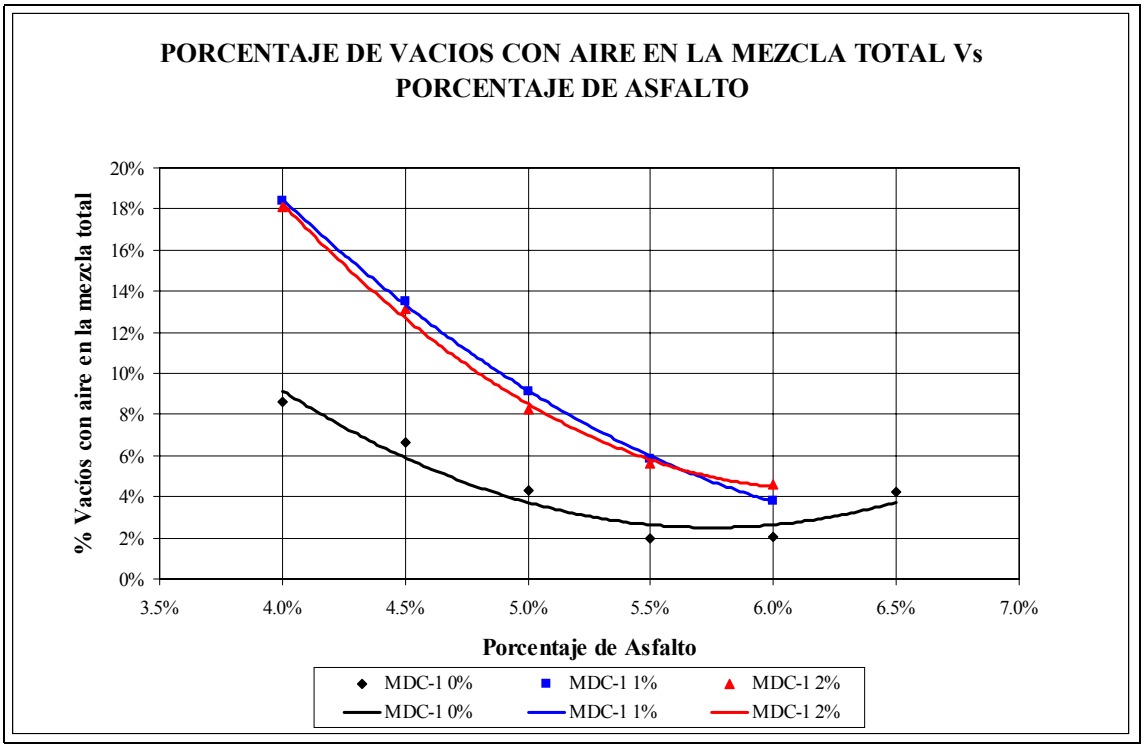


Figura 6.19. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1.

Cuadro 6.43. Resultados de Vacíos con aire en la mezcla total para los diseño MDC-2.

% de asfalto	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Código	% Vacíos con aire en la mezcla total					
MDC-2 0%	8.58	6.65	5.02	3.22	2.54	2.89
MDC-2 1%	-	12.29	8.75	7.42	5.65	2.95
MDC-2 2%	-	10.31	8.18	7.03	5.71	3.52

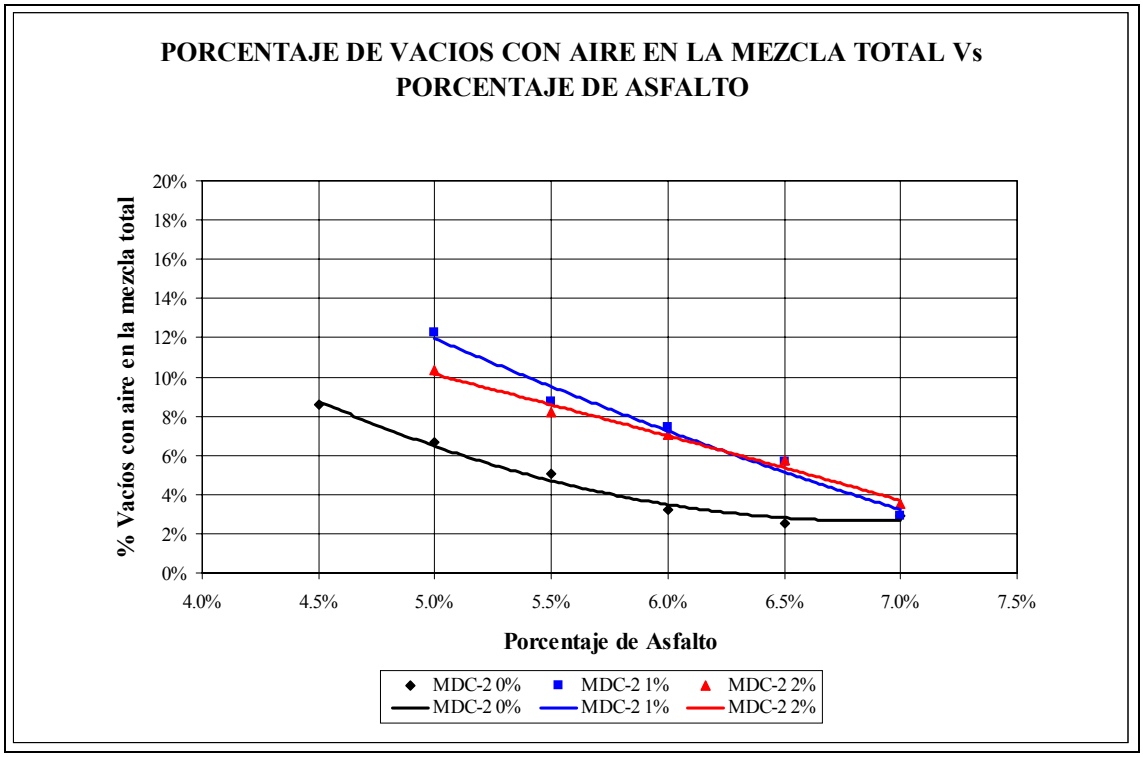


Figura 6.20. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2.

Se puede observar que la adición de caucho incrementa el contenido de vacíos razonablemente, y que este aumento disminuye con el contenido de ligante; esto se debe a que en el proceso de compactación las partículas de GCR, por su característica elástica, generan un efecto rebote haciendo que no se obtenga el mismo nivel de densificación.

También se puede apreciar que el contenido de vacíos es alto para cantidades bajas de cemento asfáltico, y que este valor va disminuyendo a medida que el contenido de cemento asfáltico se incrementa. Esto se debe a que el cemento asfáltico va ocupando los espacios vacíos en la mezcla.

6.2.6.1.2 Estabilidad. A continuación se presentan los resultados de Estabilidad Marshall para los diseños MDC-1 y MDC-2 en las mezclas sin caucho y mejoradas con caucho. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 1559–89.

Cuadro 6.44. Resultados de Estabilidad Marshall para los diseño MDC-1.

% de asfalto	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Código	Estabilidad [kg]					
MDC-1 0%	1712	1764	1854	1778	1612	1592
MDC-1 1%	683	920	901	853	887	-
MDC-1 2%	585	931	912	1098	938	-

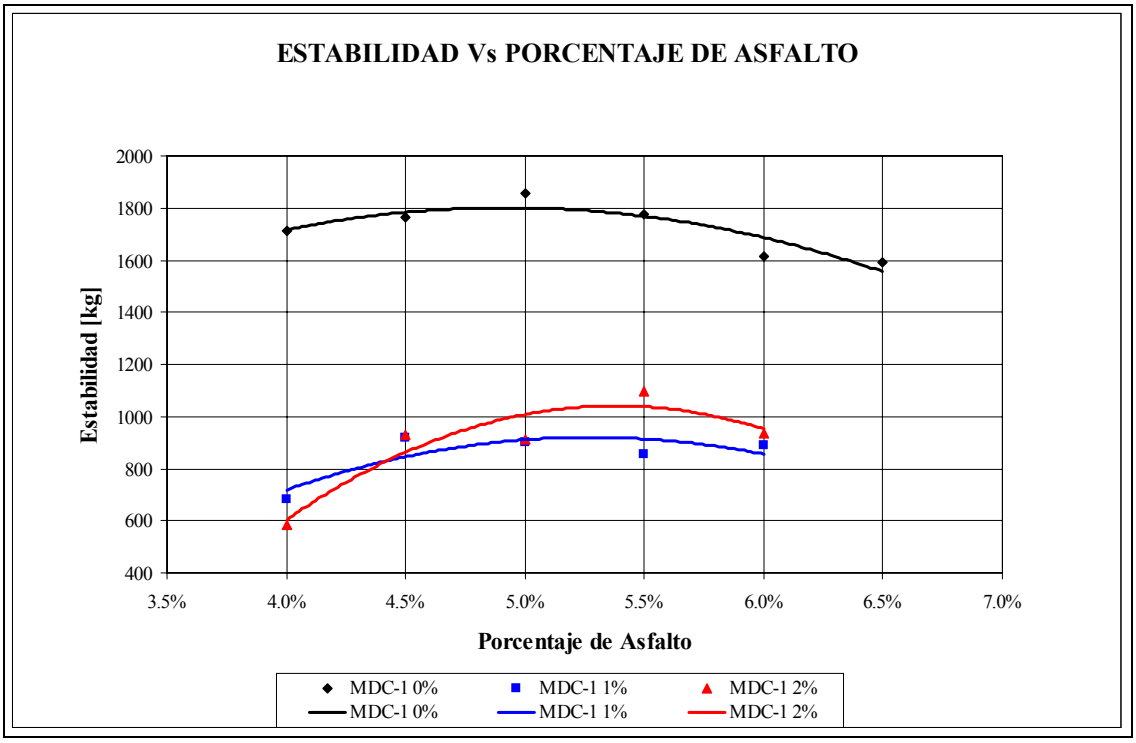


Figura 6.21. Variación de la Estabilidad Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1.

Cuadro 6.45. Resultados de Estabilidad Marshall para los diseño MDC-2.

% de asfalto	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Código	Estabilidad [kg]					
MDC-2 0%	1158	1510	1560	1546	1498	1406
MDC-2 1%	-	713	1320	1525	1130	1419
MDC-2 2%	-	723	1066	964	1025	1103

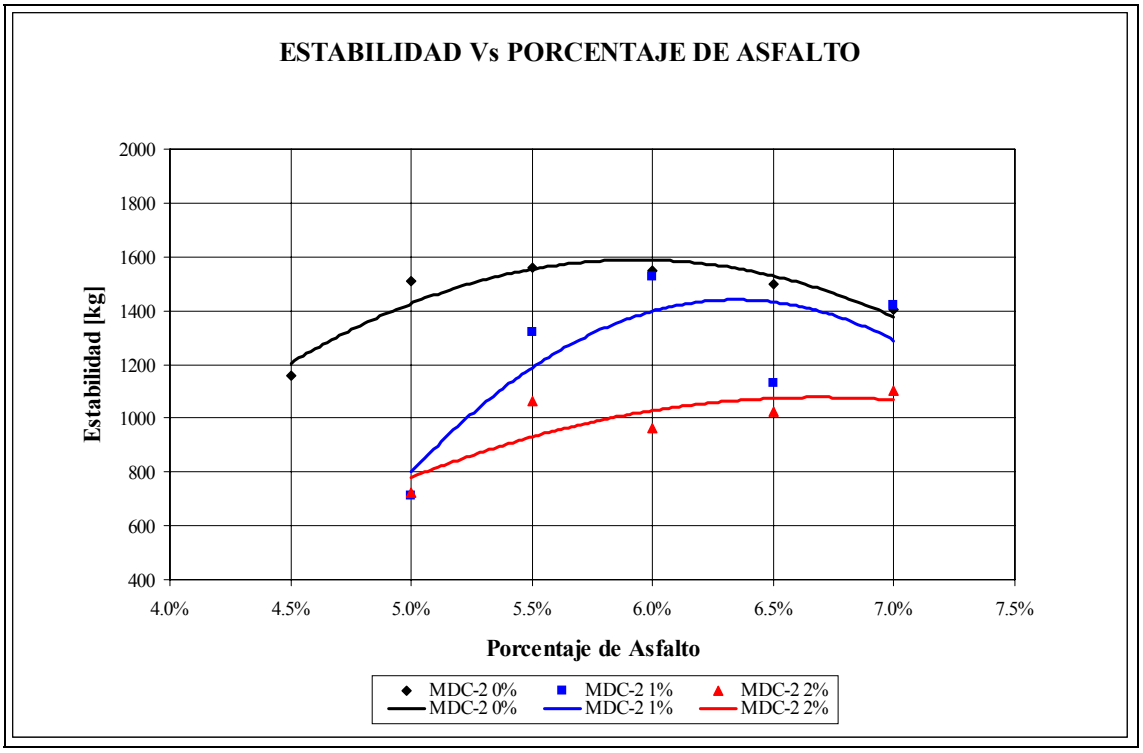


Figura 6.22. Variación de la Estabilidad Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2.

Las estabilidades obtenidas en las mezclas con GCR son inferiores a las obtenidas en las mezclas asfálticas convencionales, sin embargo, solo las probetas con bajos contenidos de ligante se encuentran fuera del límite especificado por el INVIAS para tráfico alto.. En cuanto a los diseños MDC-1 la estabilidad disminuye considerablemente, casi en la mitad , y en una menor proporción para los diseños MDC-2.

6.2.6.1.3 Flujo. A continuación se presentan los resultados de Estabilidad Marshall para los diseños MDC-1 y MDC-2 sin caucho y mejoradas con caucho. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 1559–89.

Cuadro 6.46. Resultados de Flujo Marshall para los diseño MDC-1.

% de asfalto	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Código	Flujo [mm]					
MDC-1 0%	2.10	2.58	2.62	2.71	3.13	3.47
MDC-1 1%	3.43	2.79	2.92	3.05	3.43	-
MDC-1 2%	3.30	2.54	2.92	3.05	4.19	-

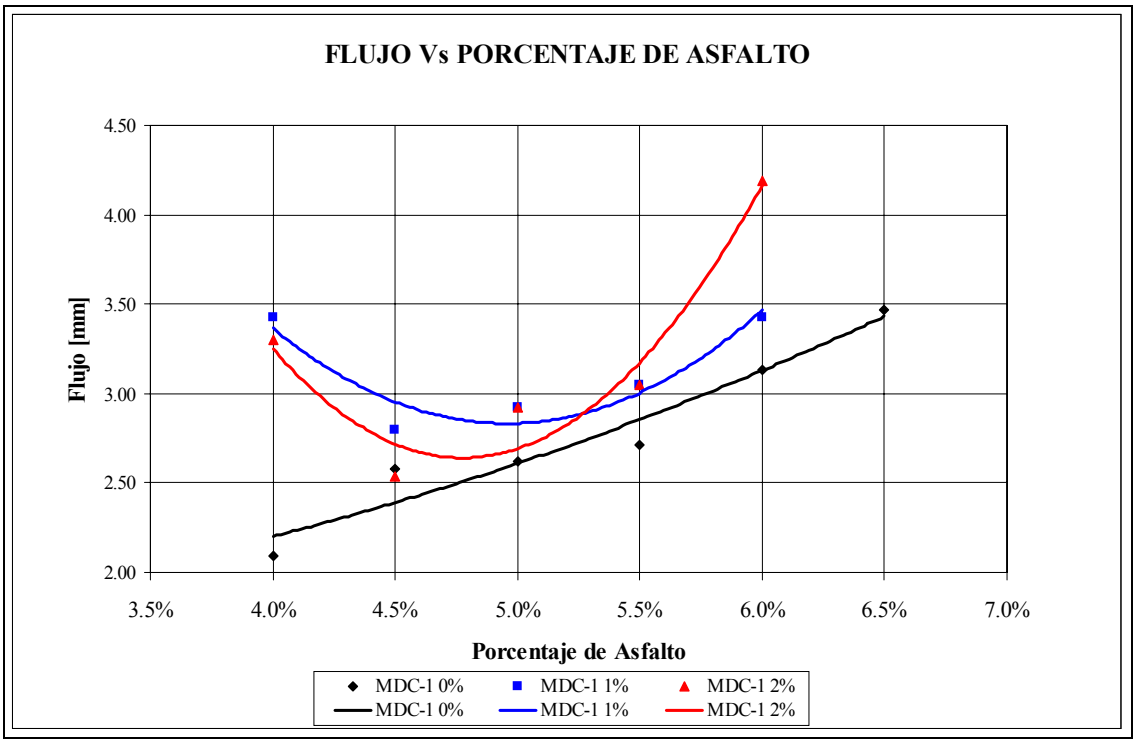


Figura 6.23. Variación del Flujo Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1.

Cuadro 6.47. Resultados de Flujo Marshall para los diseño MDC-2.

% de asfalto	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Código	Flujo [mm]					
MDC-2 0%	2.46	2.50	2.79	2.79	2.84	3.34
MDC-2 1%	-	3.30	3.24	2.98	3.05	3.13
MDC-2 2%	-	3.30	3.05	3.30	2.79	3.18

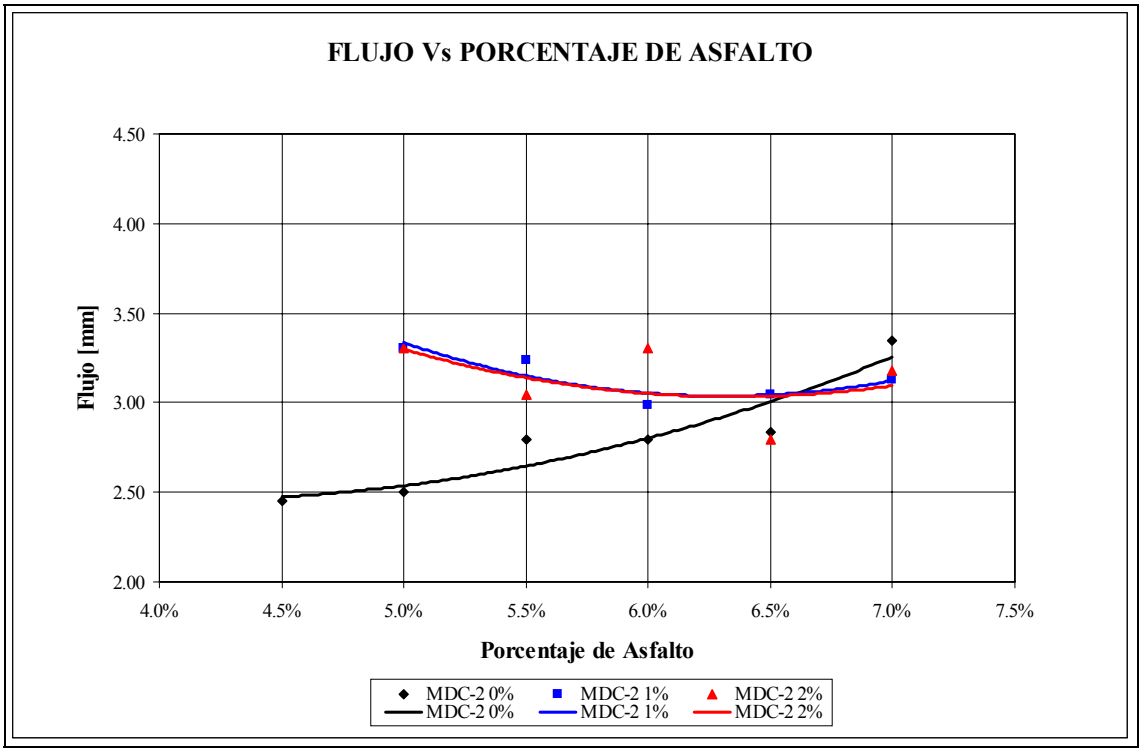


Figura 6.24. Variación del Flujo Marshall respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2.

El flujo en las mezclas asfálticas mejoradas con caucho inicialmente es alto para contenidos de ligante bajos, y disminuye hasta un cierto contenido de asfalto a partir del cual vuelve a aumentar conservándose para el óptimo establecido en el aparte 6.2.6.1.6 en el intervalo permitido para capa de rodadura, a excepción del diseño MDC-1 con 2% de GCR que alcanza a sobrepasar el límite superior especificado con un contenido de ligante de 7.0%. Esto se debe a que bajos contenidos de ligante en una mezcla asfáltica mejorada con GCR son insuficientes para proporcionar una buena cohesión siendo relevante el comportamiento elástico del GCR.

6.2.6.1.4 Peso Unitario. A continuación se presentan los resultados de Peso unitario para los diseños MDC-1 y MDC-2 en las mezclas asfálticas sin caucho y mejoradas con caucho. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 2726.

Cuadro 6.48. Resultados de Peso Unitario para los diseño MDC-1.

% de asfalto	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Código	Peso Unitario [g/cm³]					
MDC-1 0%	2.15	2.17	2.18	2.21	2.22	2.23
MDC-1 1%	1.96	2.02	2.04	2.05	2.09	-
MDC-1 2%	1.97	2.05	2.05	2.08	2.10	-

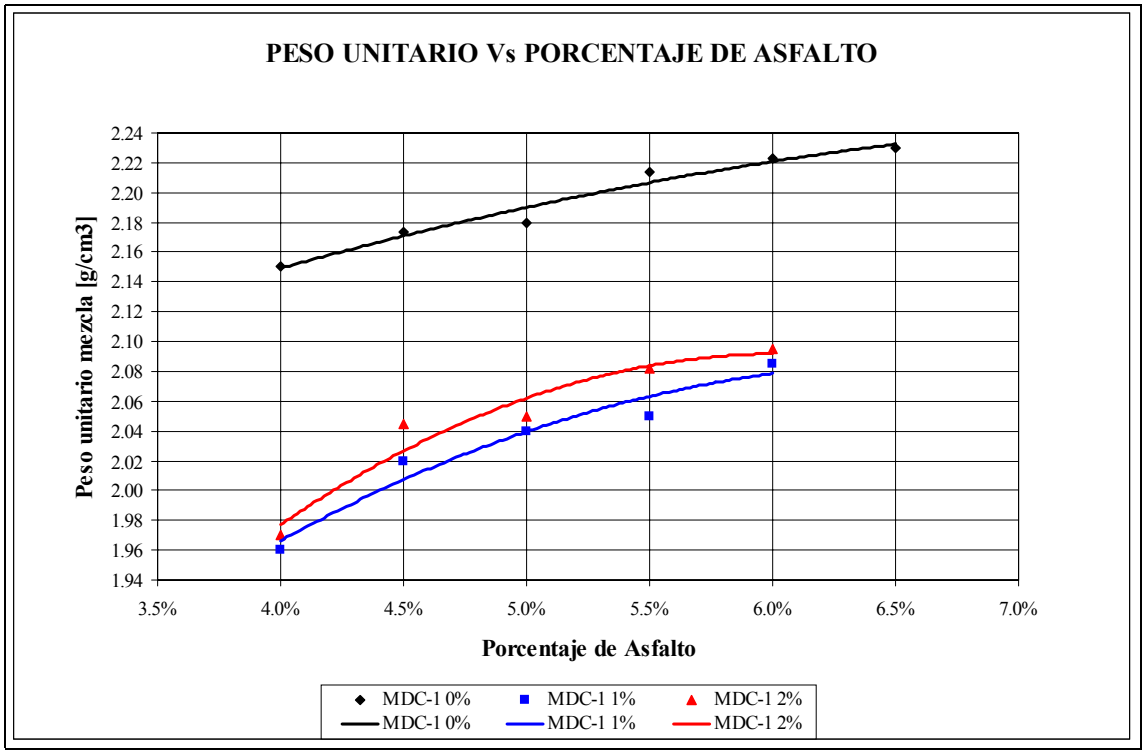


Figura 6.25. Variación del Peso Unitario respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1.

Cuadro 6.49. Resultados de Peso Unitario para los diseño MDC-2.

% de asfalto	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Código	Peso Unitario [g/cm³]					
MDC-2 0%	2.14	2.16	2.18	2.20	2.21	2.22
MDC-2 1%		2.02	2.08	2.11	2.12	2.15
MDC-2 2%		2.03	2.04	2.07	2.10	2.13

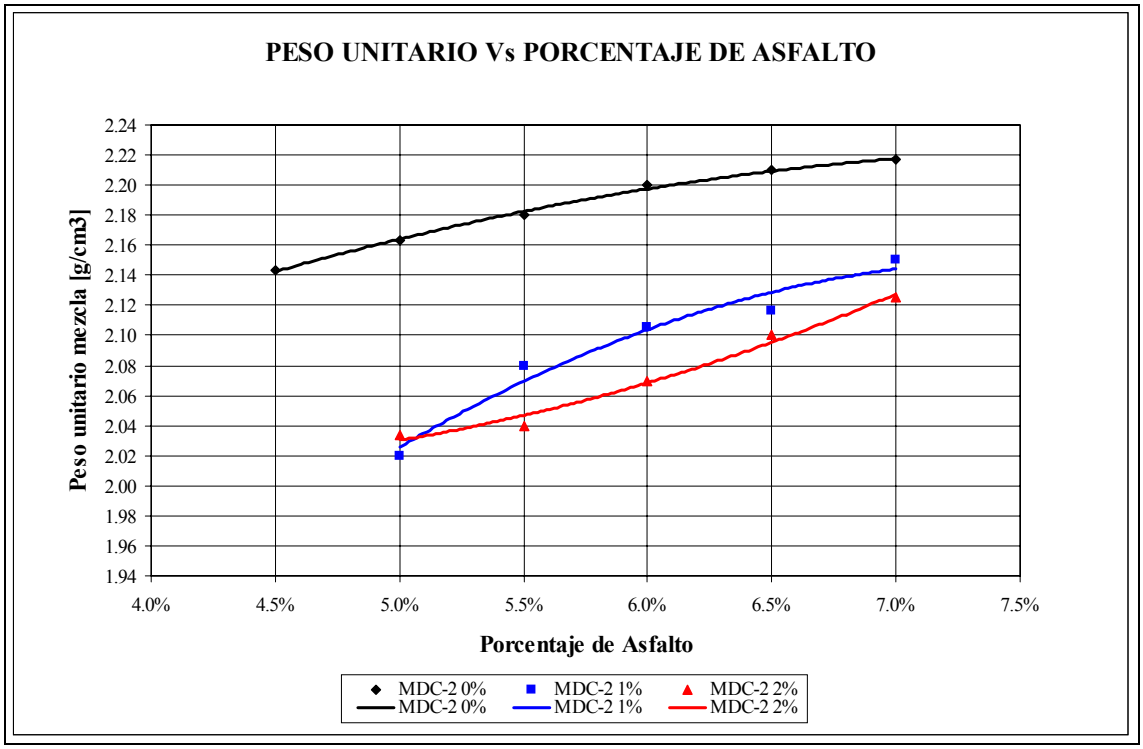


Figura 6.26. Variación del Peso Unitario respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2.

El peso unitario de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho disminuye a medida que la proporción de este incrementa. Esto se debe a que la sustitución del agregado fino por GCR se realiza por peso, dando como resultado mayor volumen de GCR incorporado a la mezcla, comparado con el volumen de agregado que es remplazado, debido a que el GCR es menos denso que los agregados. Como resultado se obtiene una mezcla asfáltica de igual peso pero con mayor volumen respecto al diseño original.

6.2.6.1.5 Vacíos en los agregados minerales. A continuación se presentan los resultados de los Vacíos en los agregados minerales para los diseños MDC-1 y MDC-2 sin caucho y mejoradas con caucho.

Cuadro 6.50. Resultados de los Vacíos en los agregados minerales para los diseño MDC-1.

% de asfalto	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5
Código	% Vacíos en Agregados minerales					
MDC-1 0%	21.52	21.08	21.25	20.47	20.53	20.72
MDC-1 1%	29.16	27.38	27.04	27.07	26.22	-
MDC-1 2%	29.87	27.58	27.78	27.06	26.60	-

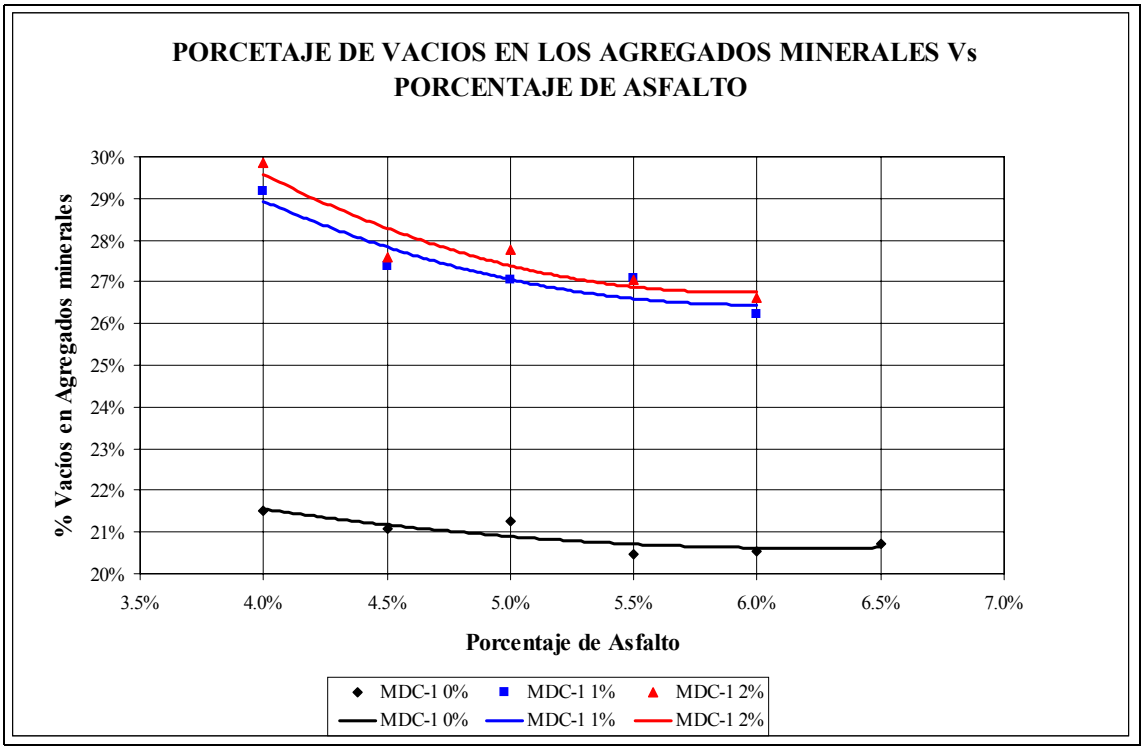


Figura 6.27. Variación del Porcentaje de Vacíos en los agregados minerales respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-1.

Cuadro 6.51. Resultados de los Vacíos en los agregados minerales para los diseño MDC-2.

% de asfalto	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0
Código	% Vacíos en Agregados minerales					
MDC-2 0%	22.17	21.86	21.67	21.37	21.43	21.62
MDC-2 1%	-	27.76	26.01	25.51	25.50	24.73
MDC-2 2%	-	27.99	28.13	27.46	26.80	26.33

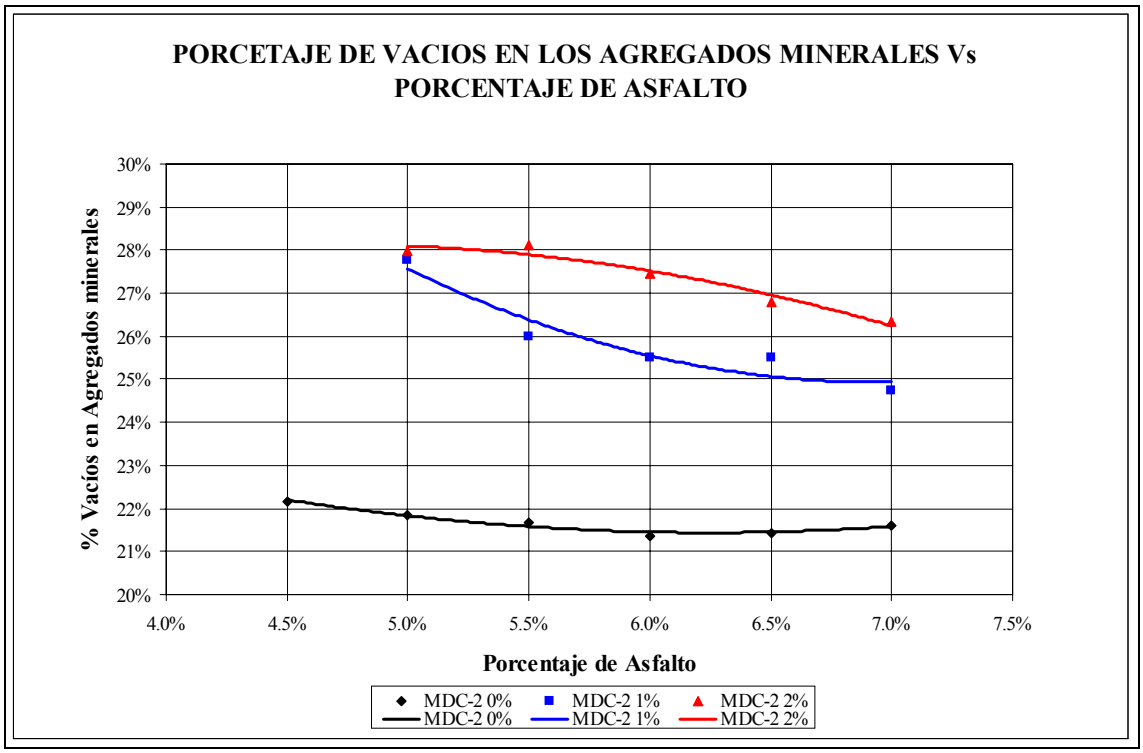


Figura 6.28. Variación del Porcentaje de Vacíos en los agregados minerales respecto al porcentaje de cemento asfáltico para los diseños MDC-2.

Se puede observar que los vacíos en los agregados minerales de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho aumentan a medida que la proporción del GCR incrementa.

6.2.6.1.6 Diseño óptimo. La escogencia del porcentaje óptimo de cemento asfáltico en cada diseño se realizó de acuerdo al criterio del porcentaje de vacíos con aire en la mezcla asfáltica; por consiguiente se eligió aquél que proporcionara un valor de vacíos con aire de 5%, el cual es el valor medio del intervalo que especifica el INVIAS.

En el siguiente cuadro se presentan para cada una de las mezclas asfálticas estudiadas las cantidades adecuadas de ligante y los valores de estabilidad y flujo Marshall determinados para un contenido de vacíos con aire de 5%. En este cuadro resumen se podrá observar que

el único parámetro que no se cumple según las especificaciones del INVIAS es el flujo para el diseño MDC-1 con 2% de GCR, cuyo valor está solo un poco por encima del límite especificado.

Cuadro 6.52. Resultados de los diseños Marshall.

Ensayo	Vacíos con aire en la mezcla asfáltica	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico	Estabilidad	Flujo	Peso Unitario	Vacíos en los agregados minerales
	[%]	[%]	[kg]	[mm]	[g/cm³]	[%]
Norma	INV E-736	-	INV E-748	INV E-748	INV E-733	-
Especificación	4-6		min. 750	2-3.5	-	mín. 14
MDC-1 0%	5.0	4.7	1796	2.5	2.18	21.1
MDC-1 1%	5.0	5.7	898	3.1	2.07	26.5
MDC-1 2%	5.0	5.8	1012	3.6	2.09	26.8
Especificación	4-6		mín. 750	2-3.5	-	mín. 15
MDC-2 0%	5.0	5.4	1538	2.6	2.18	21.6
MDC-2 1%	5.0	6.5	1429	3.0	2.13	25.1
MDC-2 2%	5.0	6.6	1077	3.0	2.10	26.8

6.2.6.2 Módulo dinámico. La evaluación de los módulos dinámicos se obtiene mediante un ensayo en el cual se somete a compresión axial inconfinada una probeta de mezcla bituminosa; esta probeta es expuesta a un barrido de frecuencias de aplicación de carga a tres temperaturas diferentes, una baja de 5°C, una intermedia de 25°C, y una alta de 40°C. El módulo dinámico es entonces la relación entre la carga aplicada a la probeta y la deformación unitaria recuperable que esta sufre.

Este ensayo se efectúa a probetas de concreto asfáltico de 15 cm de diámetro y altura entre 15 y 20 cm elaboradas en la prensa de compactación giratoria PCG. Las probetas se someten a un esfuerzo de compresión axial sinusoidal, medio seno inverso, a una temperatura y frecuencia de carga dada, midiendo la respuesta resultante recuperable de la deformación axial de la probeta. Las frecuencias de ensayo fueron 1, 4, 10 y 16 Hz. El

equipo de carga usado fue la Máquina Universal MTS, empleándose extensómetros LVDT de 100 mm. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-754.

Fotografía 6.13. Evaluación de Módulos Dinámicos de mezclas asfálticas en la MTS.

Los Módulos Dinámicos se analizaron de acuerdo a su variación con el incremento en la frecuencia de carga a diferentes temperaturas, así como su variación relacionada con los incrementos de temperatura a diferentes frecuencias y el incremento en el porcentaje de caucho en las mezclas asfálticas a diferentes temperaturas.

En las Figuras 6.32 y 6.33 se podrá observar que el Módulo Dinámico de las mezclas con GCR respecto a las mezclas convencionales disminuye considerablemente, aproximadamente hasta en un 64% en el diseño MDC-1 con 1% de GCR (a 5°C y 1 Hz), y 81% con 2% de GCR (a 25°C y 16 Hz); y en los diseños MDC-2, Figuras 6.35 y 6.36, hasta

un 69% con contenidos de 1% de GCR (a 5°C y 1 Hz), y 77% con 2% de GCR (a 25°C y 16 Hz). De estas cifras se puede observar también que el Módulo Dinámico se afecta más para los diseños MDC-2 que para los MDC-1.

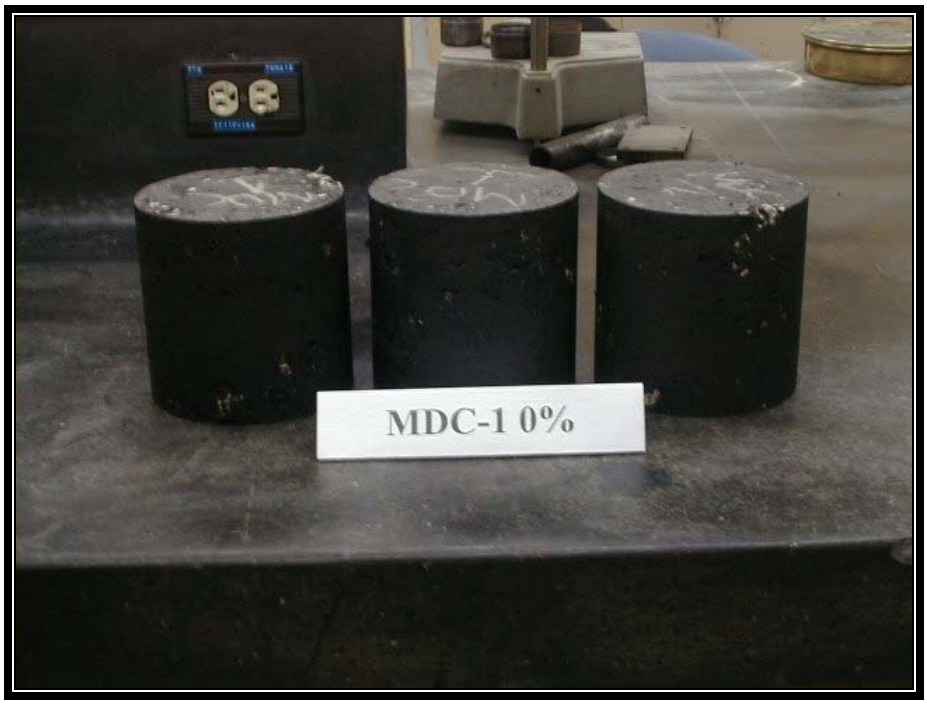
El Módulo Dinámico en los diseños mejorados con caucho son menos susceptibles a la frecuencia de aplicación de carga que en los diseños convencionales. Se puede observar que con un aumento de la frecuencia para temperaturas de 25°C y 40°C en los diseños sin GCR el Módulo Dinámico presenta incrementos mayores que los presentados en los diseños con GCR. Para la temperatura de 5°C los incrementos en ambos diseños son muy parecidos

Para una misma frecuencia de aplicación de carga dada, se observa que los módulos disminuyen con el incremento en la temperatura como es de esperar. Así mismo se observa que el módulo a una misma frecuencia no es muy susceptible al cambio en la temperatura en los diseños con caucho manifestando una mejoría en la estabilidad térmica; situación que no se presenta en los diseños sin caucho, donde el módulo decrece considerablemente con el aumento de la temperatura, llegando a ser muy parecido a los módulos de los diseños con caucho a 40°C. Se puede concluir que para una misma frecuencia en un diseño sin caucho el Módulo Dinámico decrece a medida que se incrementa la temperatura acercándose cada vez mas a los módulos de los diseños con caucho.

En los diseños MDC-2 con porcentajes de caucho de 1% y 2% el módulo no varía mucho a iguales temperaturas y frecuencias, caso que no se presenta en los diseños MDC-1, en donde el módulo decrece con el aumento del porcentaje de caucho a iguales temperaturas y frecuencias.

Respecto a la variación del módulo en relación con la sustitución de agregado pétreo por caucho, Figuras 6.46 y 6.49, se puede observar que a bajas temperaturas el módulo decrece considerablemente cuando esta relación pasa de 0% a 1%, y su variación es pequeña cuando esta relación pasa de 1% a 2%. A medida que se incrementa la temperatura la

variación del módulo entre porcentajes de 0% a 1% y 1% a 2% se va haciendo cada vez más lineal.



Fotografía 6.14. Probetas de concreto asfáltico compactadas en la PCG para evaluar Módulos Dinámicos.

Cuadro 6.53. Resultados Módulos Dinámicos diseños MDC-1.

Temperatura de Ensayo	Frecuencia	Módulo Dinámico [kg/cm²]		
[ºC]	[Hz]	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%
5	1	151335	54346	32747
	4	171082	66031	41218
	10	188820	74747	46949
	16	198201	79249	50172
25	1	30630	15400	7192
	4	46980	21204	10067
	10	58832	24747	11689
	16	64508	27305	12482
40	1	8496	7625	4539
	4	13012	10054	6257
	10	16653	11984	7671
	16	18728	12895	8464

Cuadro 6.54. Resultados Módulos Dinámicos diseños MDC-2.

Temperatura de Ensayo	Frecuencia	Módulo Dinámico [kg/cm²]		
[ºC]	[Hz]	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%
5	1	217361	67380	62680
	4	220691	80428	77913
	10	223016	88814	85812
	16	224201	93198	89668
25	1	42014	15232	9767
	4	63865	22947	15389
	10	81585	28285	19278
	16	92028	30733	21100
40	1	10120	6181	5100
	4	16135	8431	7119
	10	21296	10240	8727
	16	24260	11247	9553

En las Figuras 6.29 a 6.31 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos con relación al incremento de la frecuencia de carga a diferentes temperaturas en los diseños MDC-1.

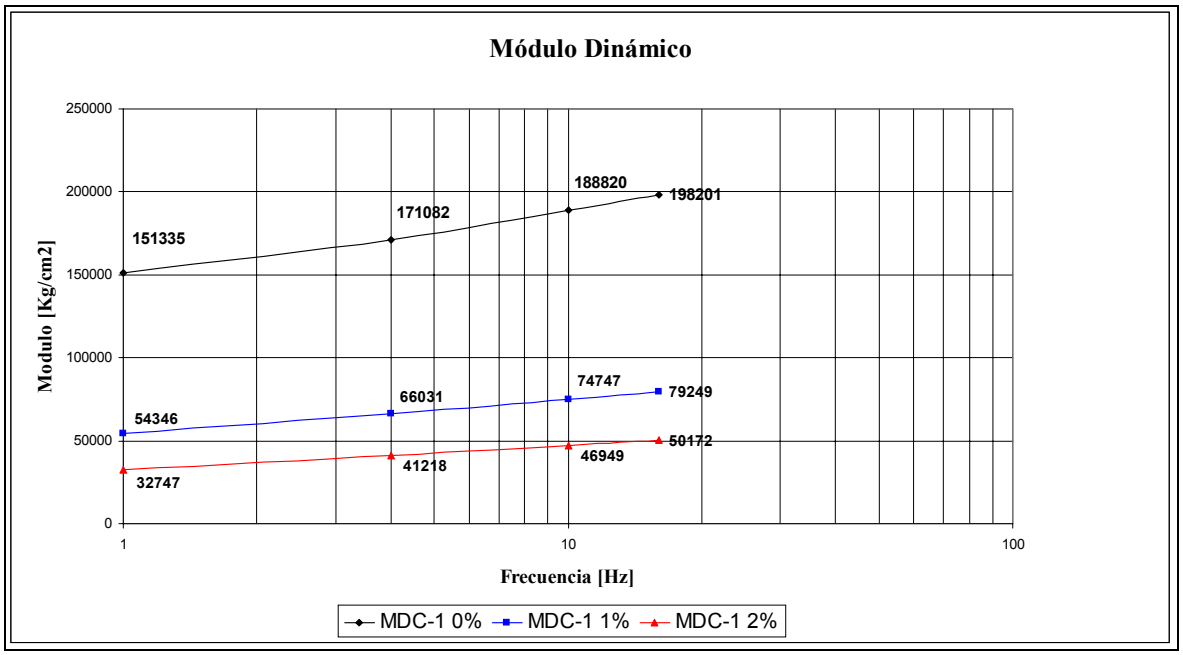


Figura 6.29. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños MDC-1.

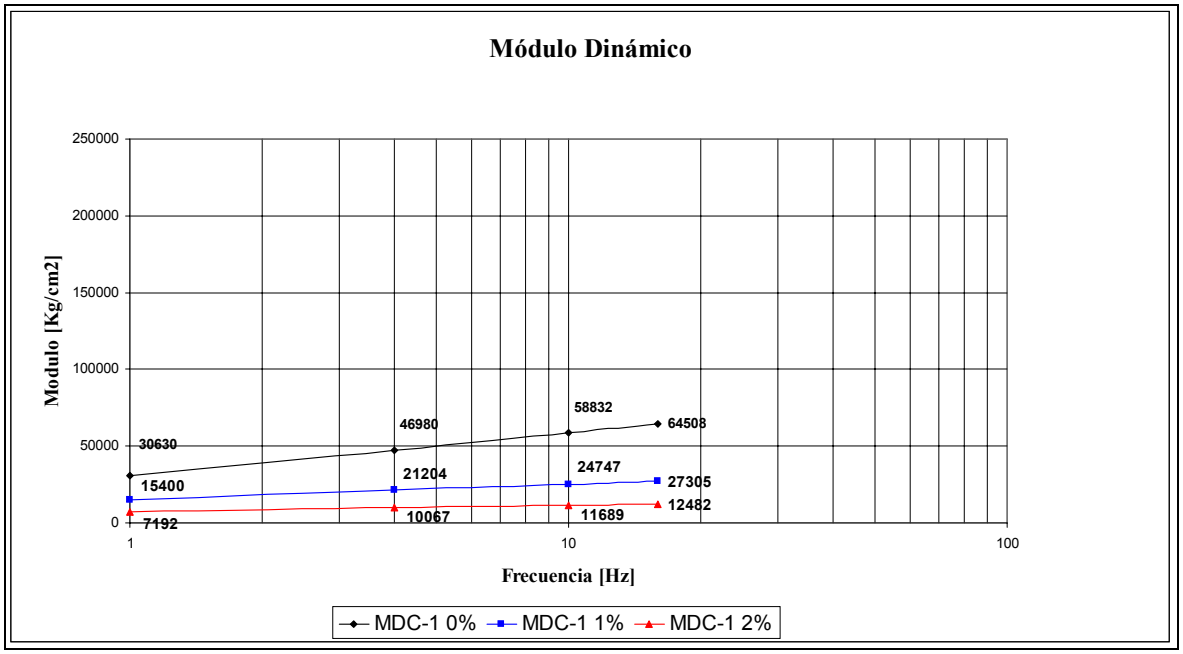


Figura 6.30. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños MDC-1.

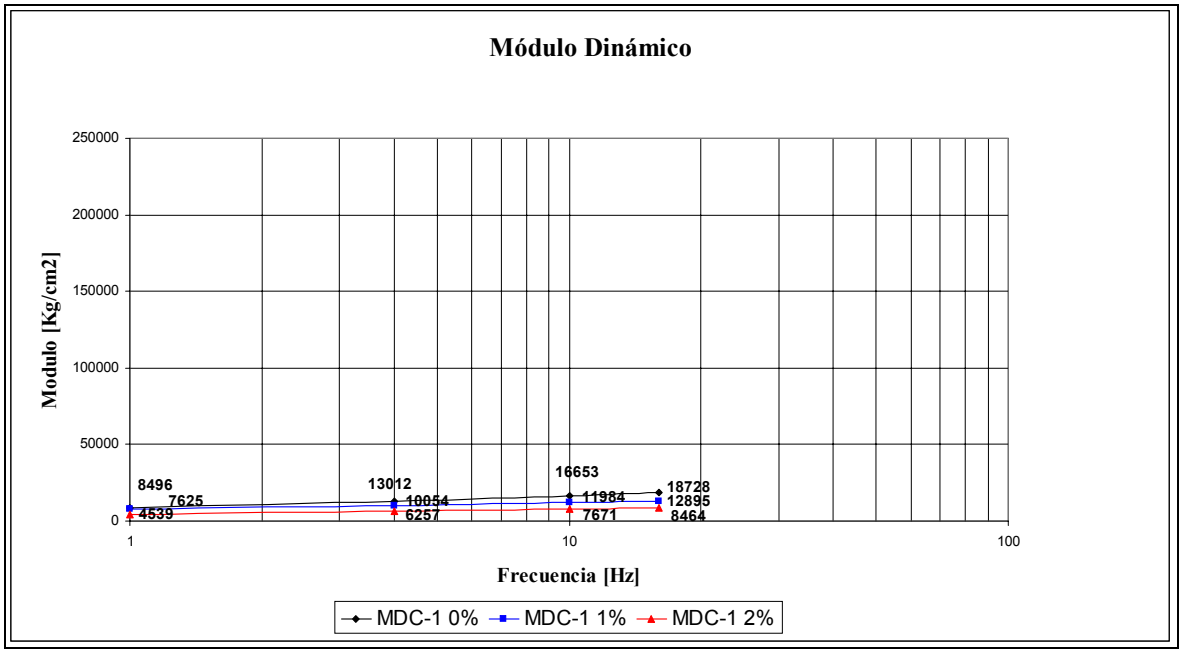


Figura 6.31. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños MDC-1.

En las Figuras 6.32 a 6.34 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos con relación al incremento de la frecuencia de carga a diferentes temperaturas en los diseños MDC-2.

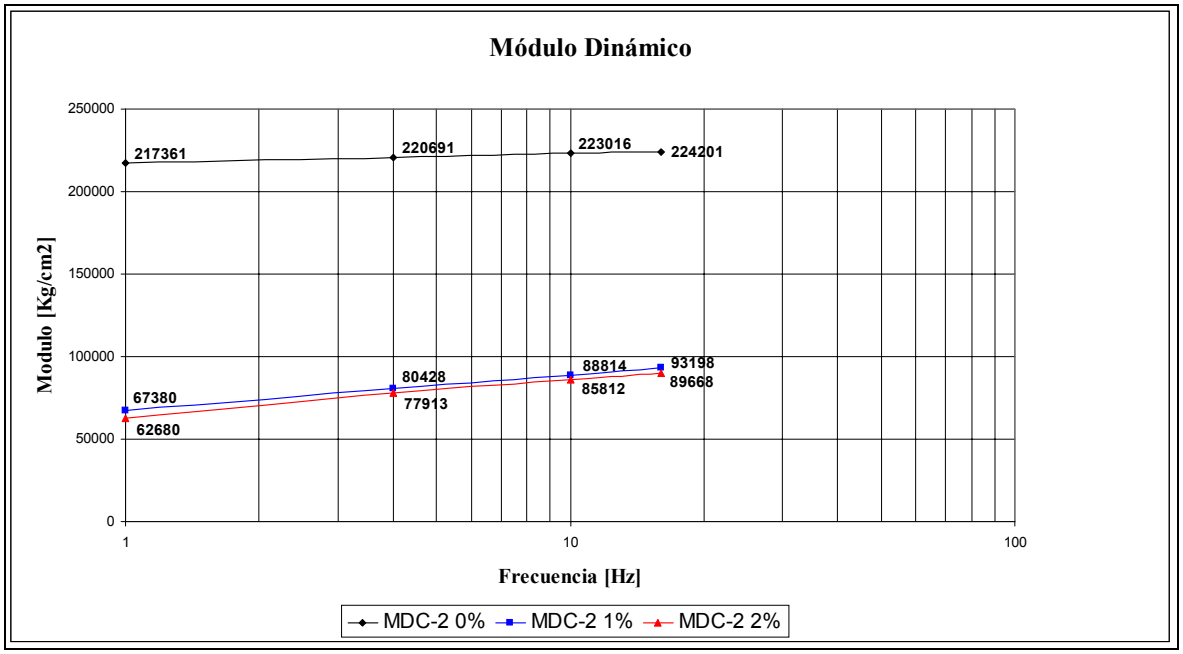


Figura 6.32. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños MDC-2.

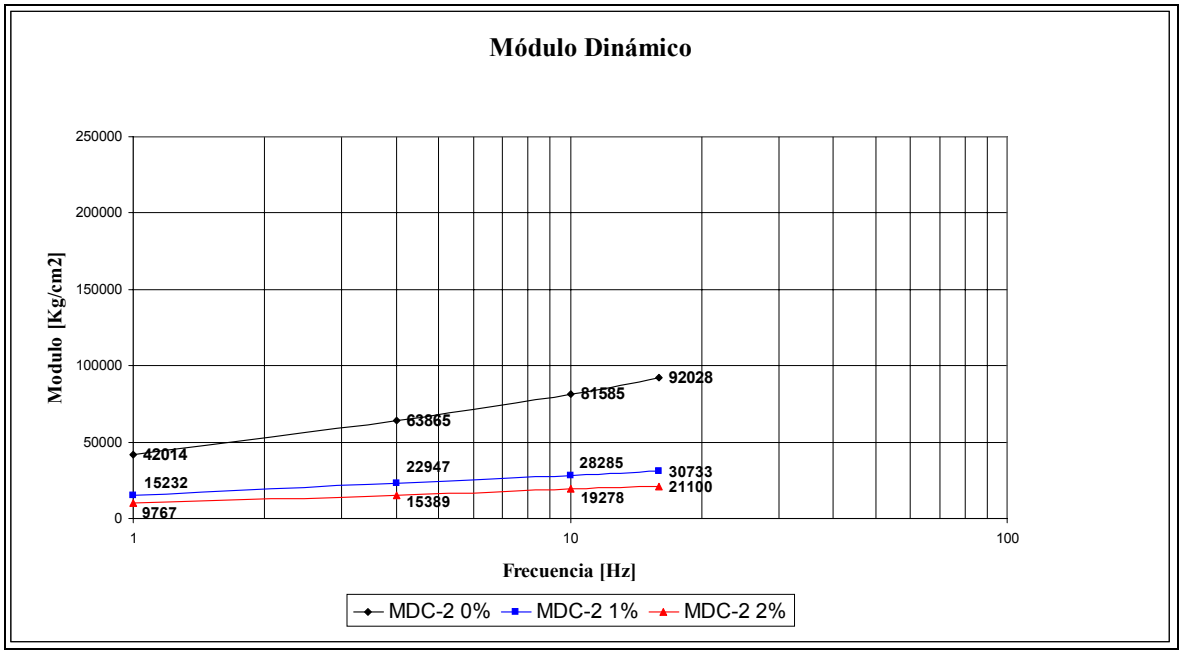


Figura 6.33. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños MDC-2.

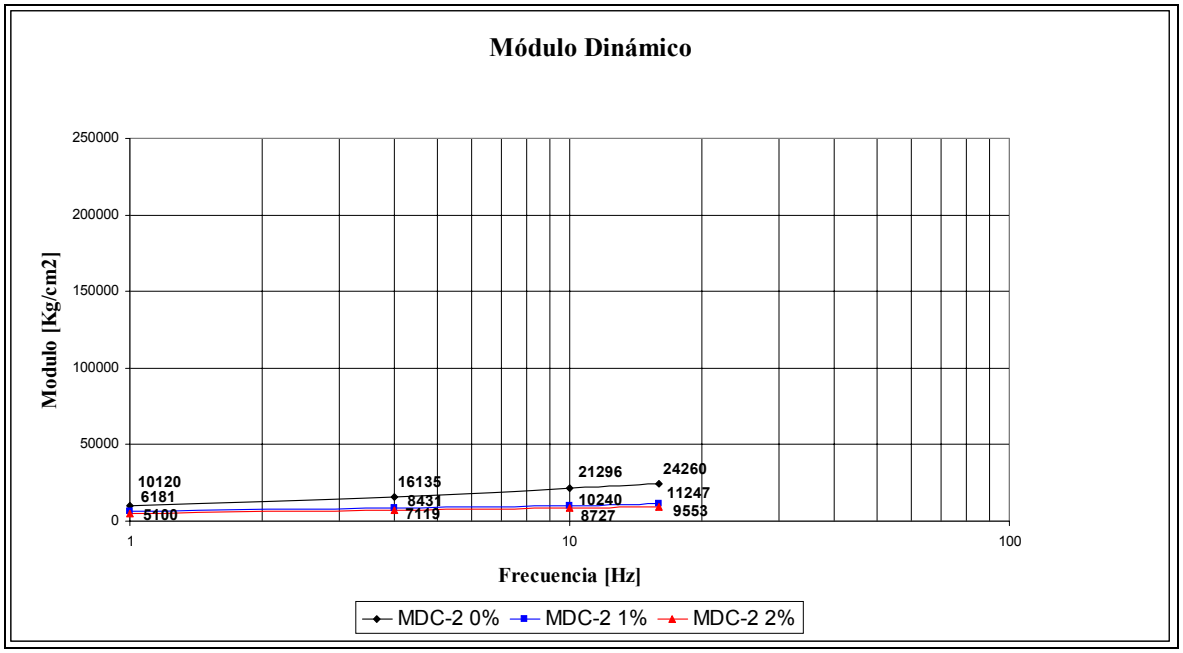


Figura 6.34. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños MDC-2.

En las Figuras 6.35 a 6.38 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos con relación a los incrementos de temperatura a diferentes frecuencias en los diseños MDC-1.

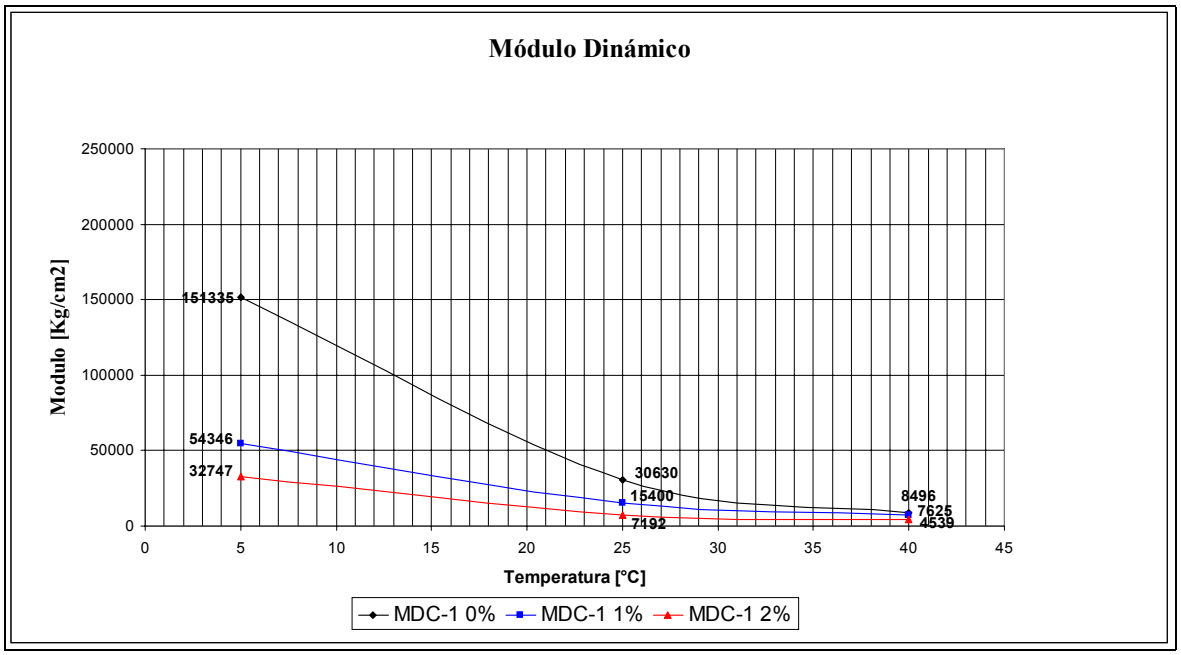


Figura 6.35. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños MDC-1.

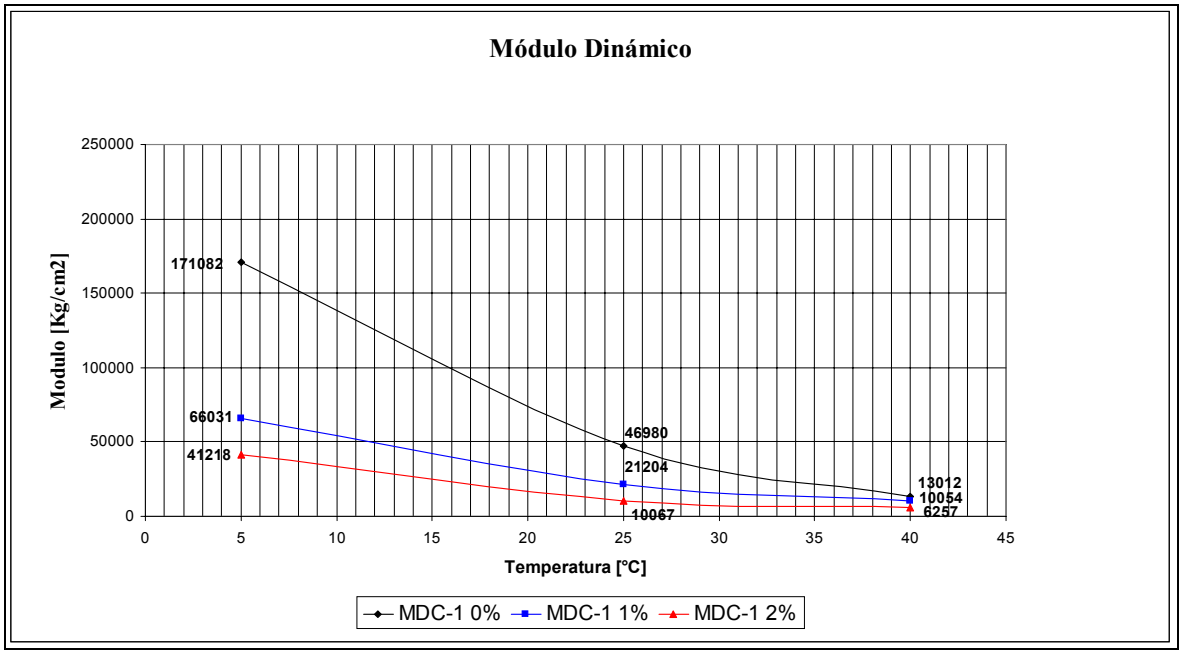


Figura 6.36. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños MDC-1.

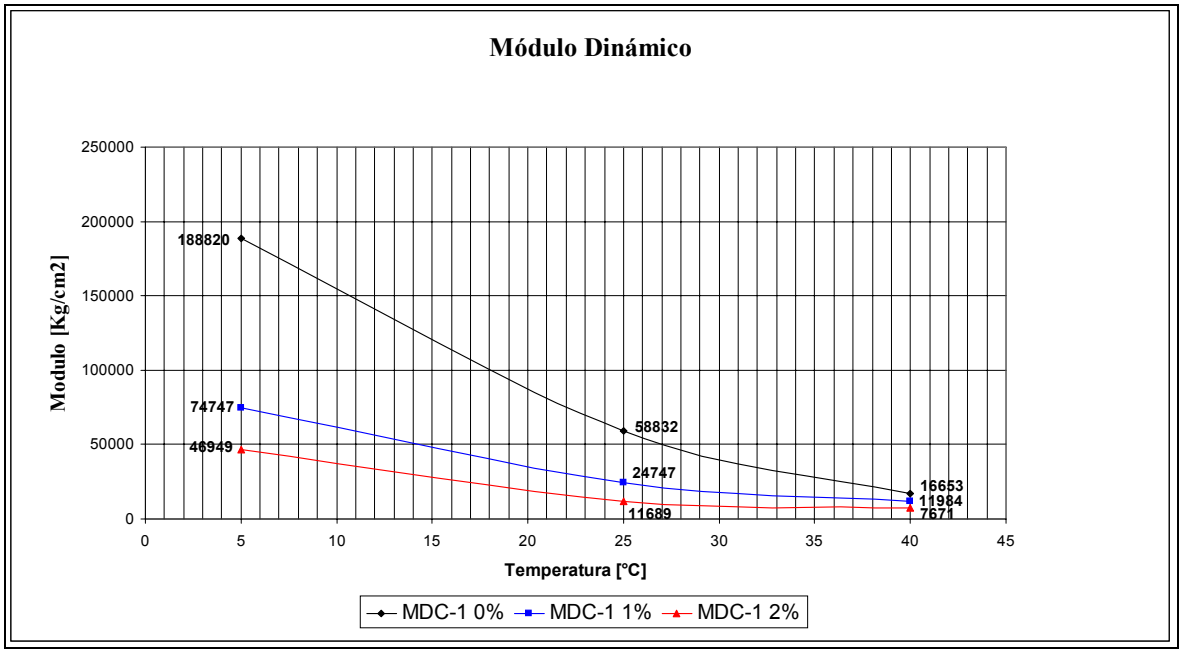


Figura 6.37. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños MDC-1.

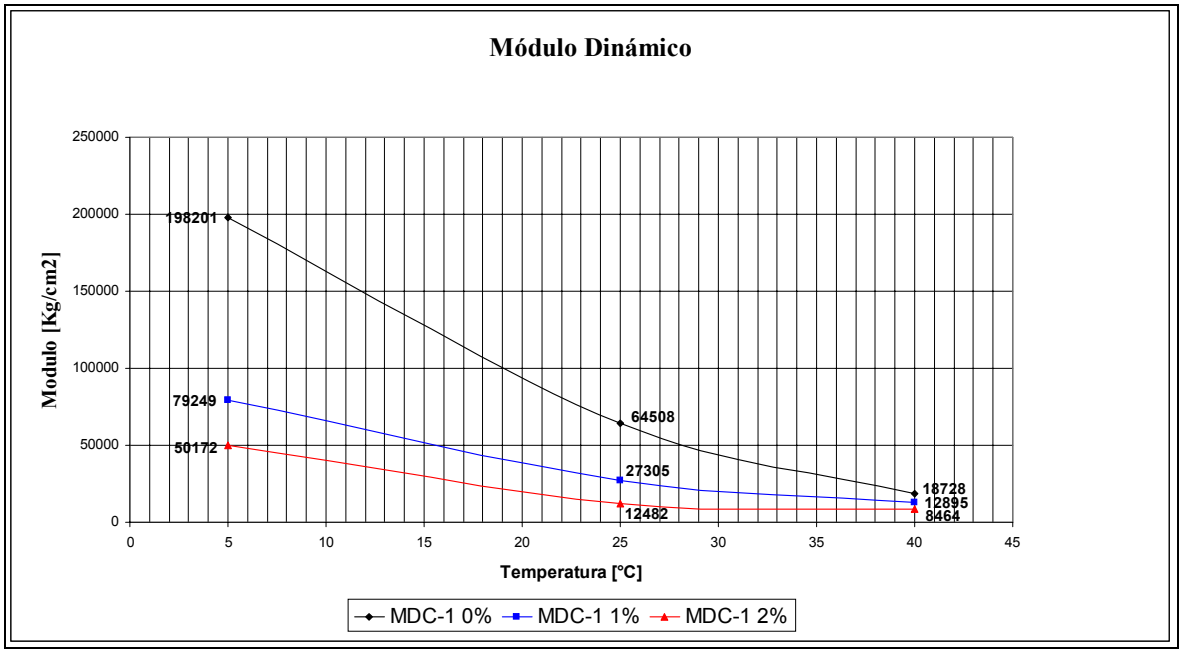


Figura 6.38. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños MDC-1.

En las Figuras 6.39 a 6.42 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos con relación a los incrementos de temperatura a diferentes frecuencias en los diseños MDC-2.

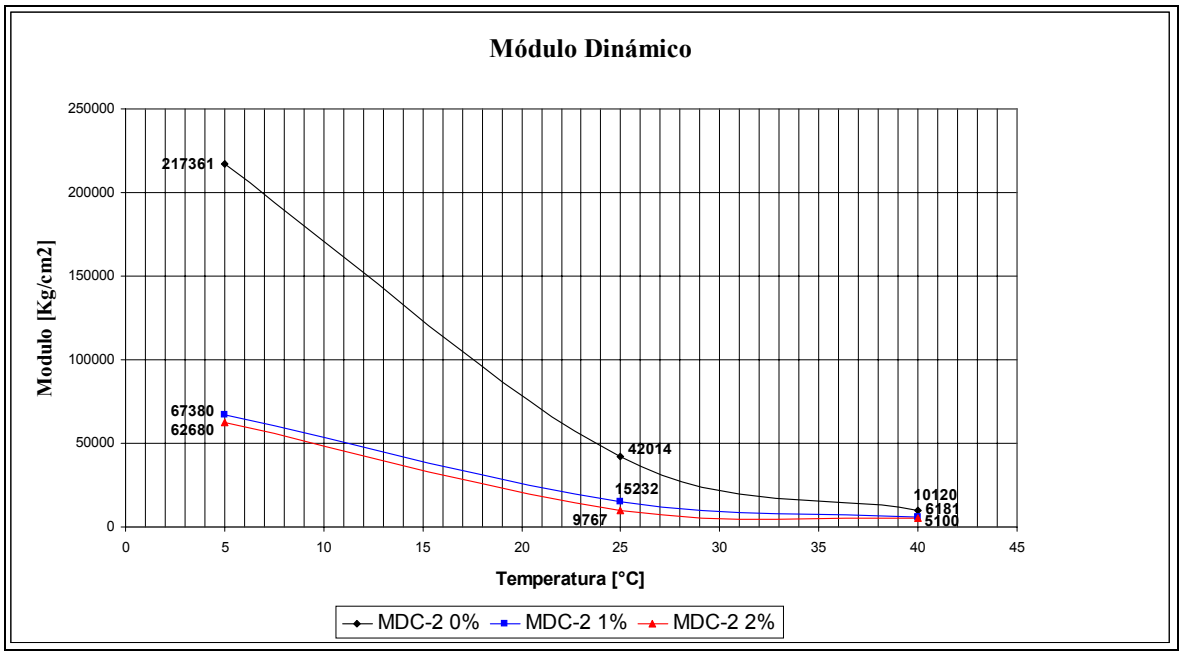


Figura 6.39. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños MDC-2.

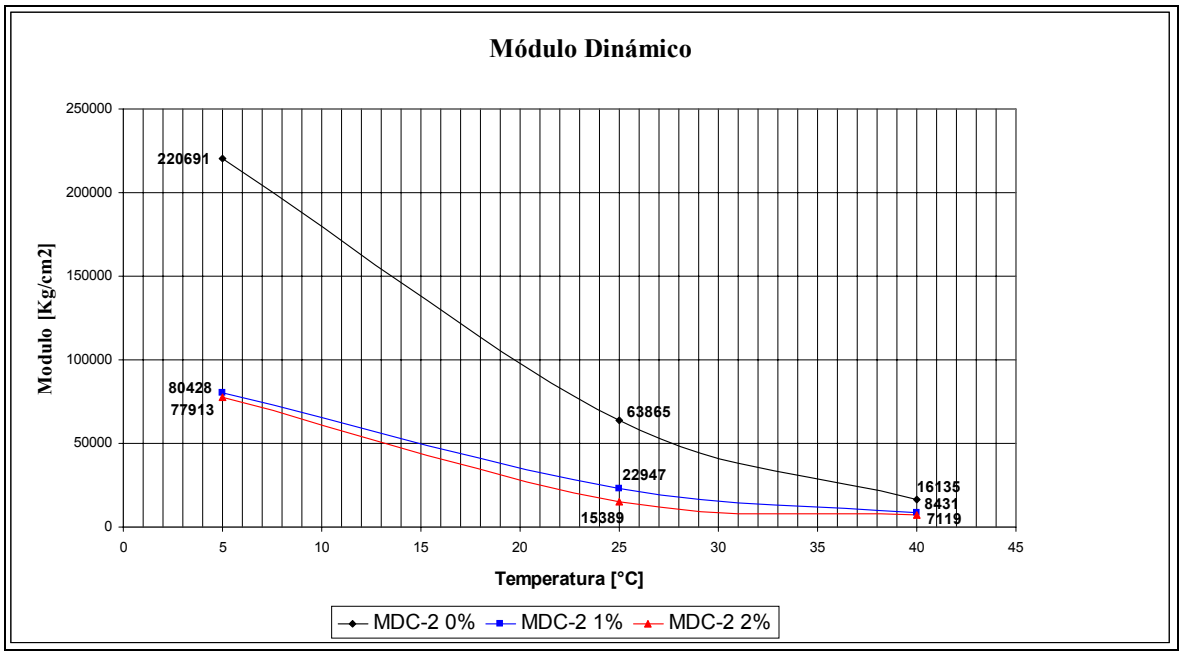


Figura 6.40. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños MDC-2.

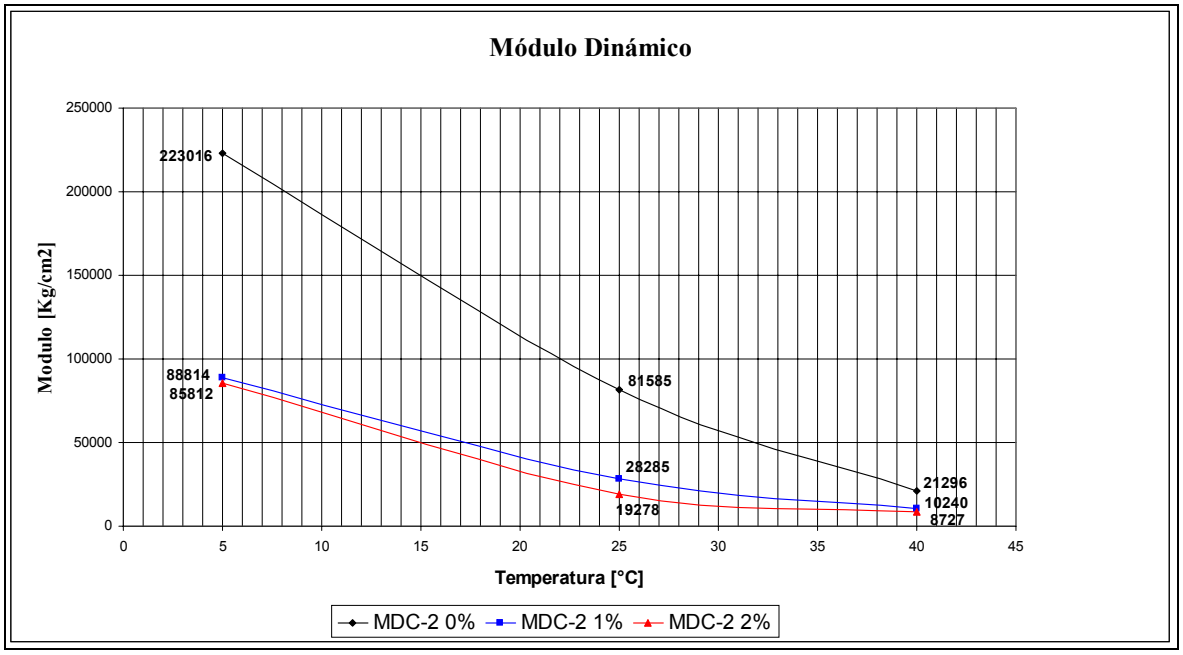


Figura 6.41. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños MDC-2.

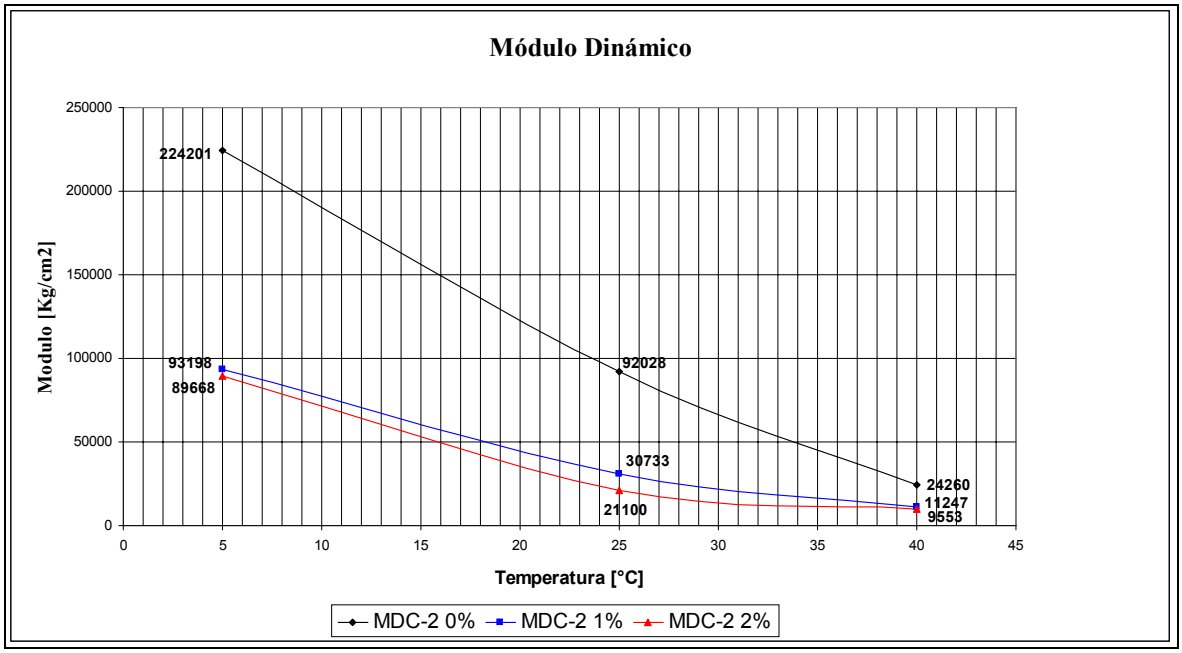


Figura 6.42. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños MDC-2.

En las Figuras 6.43 a 6.45 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos a diferentes temperaturas con relación al incremento en el porcentaje de caucho en las mezclas asfálticas, en los diseños MDC-1.

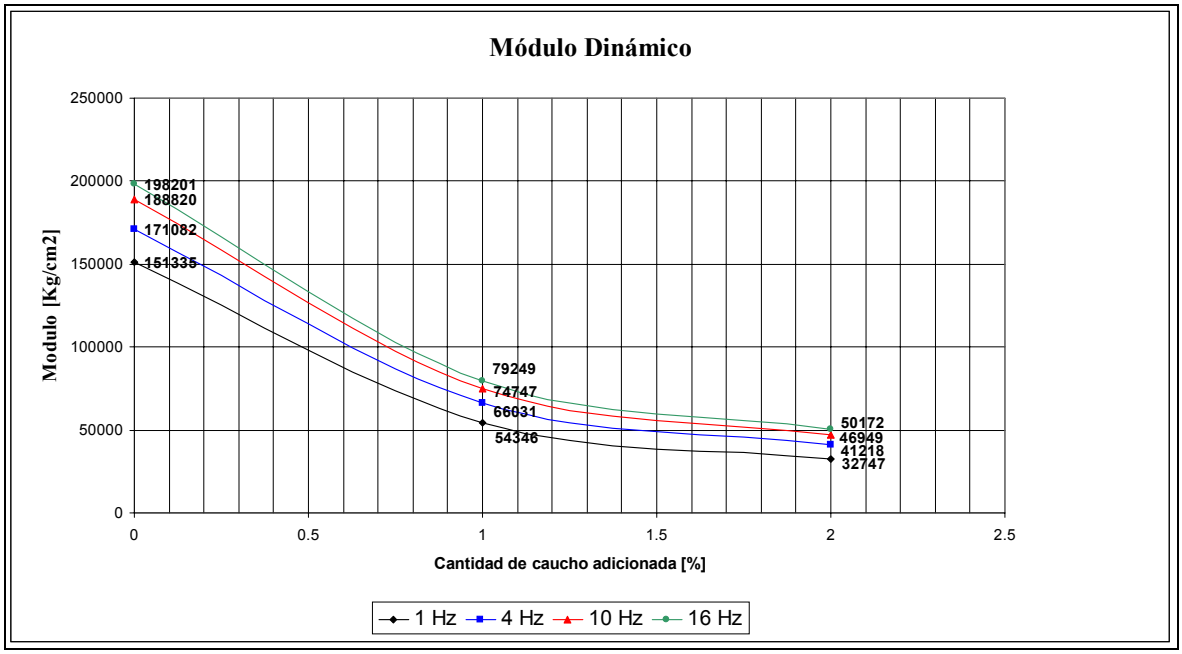


Figura 6.43. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 5°C, en los diseños MDC-1.

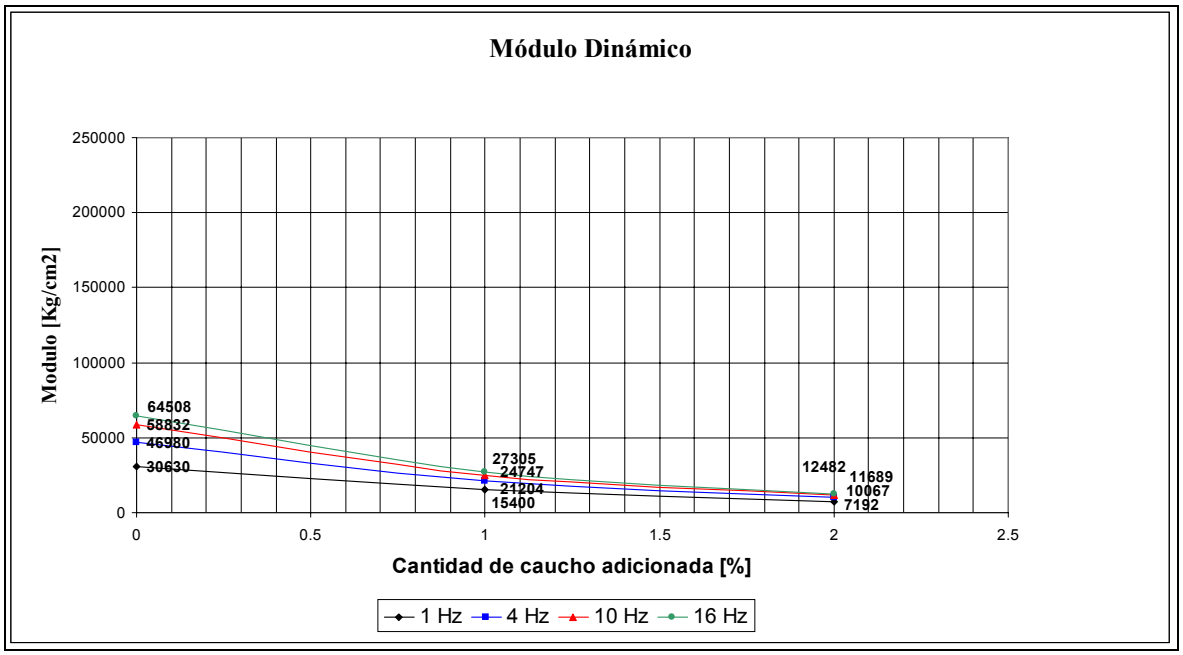


Figura 6.44. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 25°C, en los diseños MDC-1.

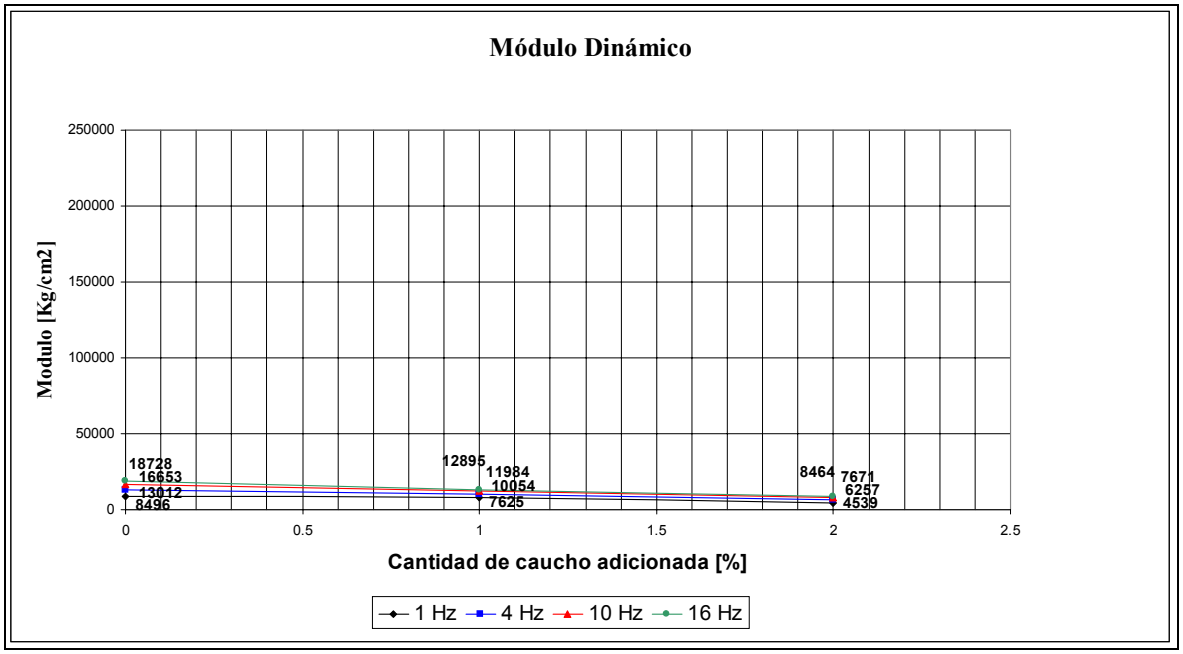


Figura 6.45. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 40°C, en los diseños MDC-1.

En las Figuras 6.46 a 6.48 se presenta la variación de los Módulos Dinámicos a diferentes temperaturas con relación al incremento en el porcentaje de caucho en las mezclas asfálticas, en los diseños MDC-2.

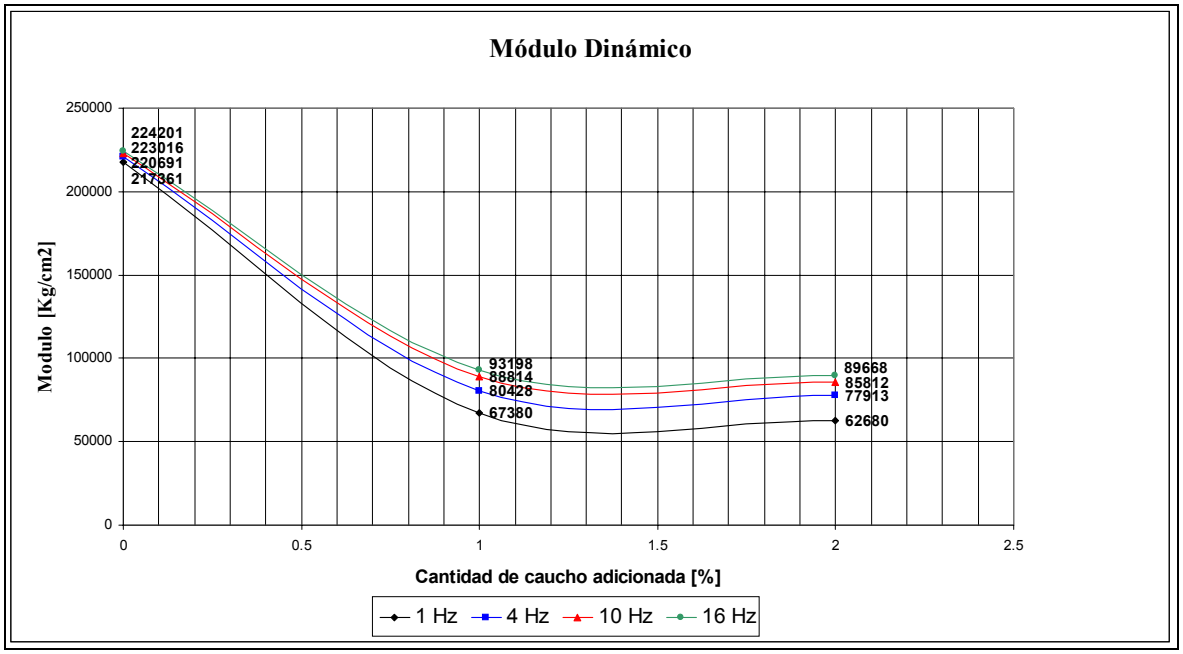


Figura 6.46. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 5°C, en los diseños MDC-2.

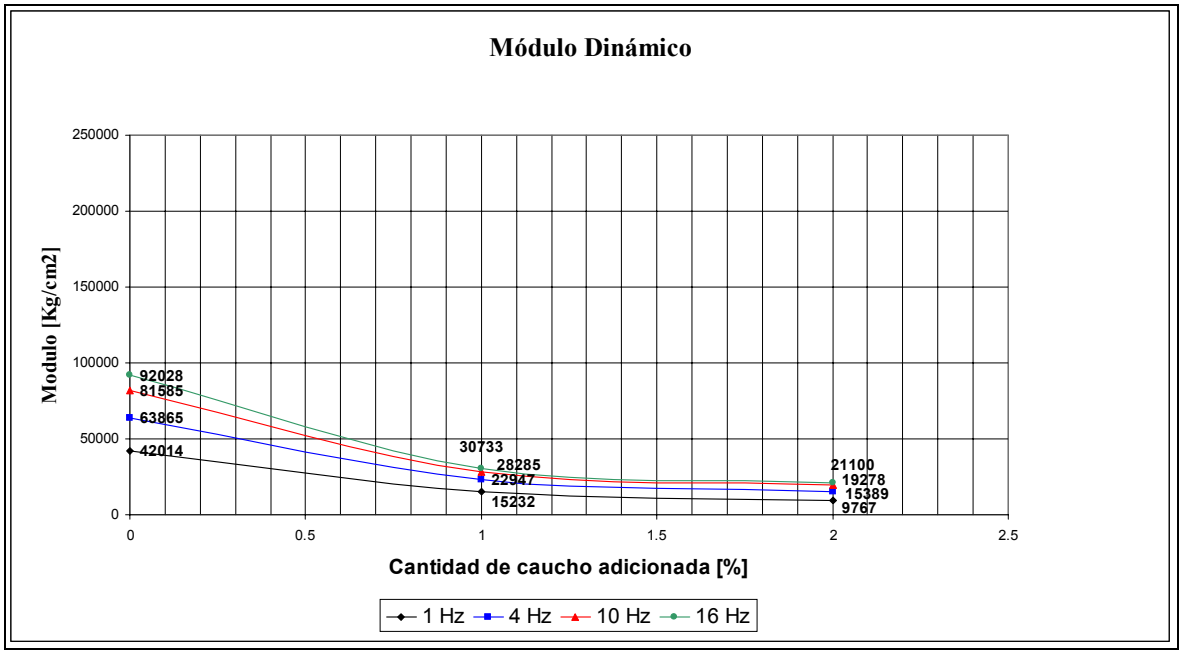


Figura 6.47. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 25°C, en los diseños MDC-2.

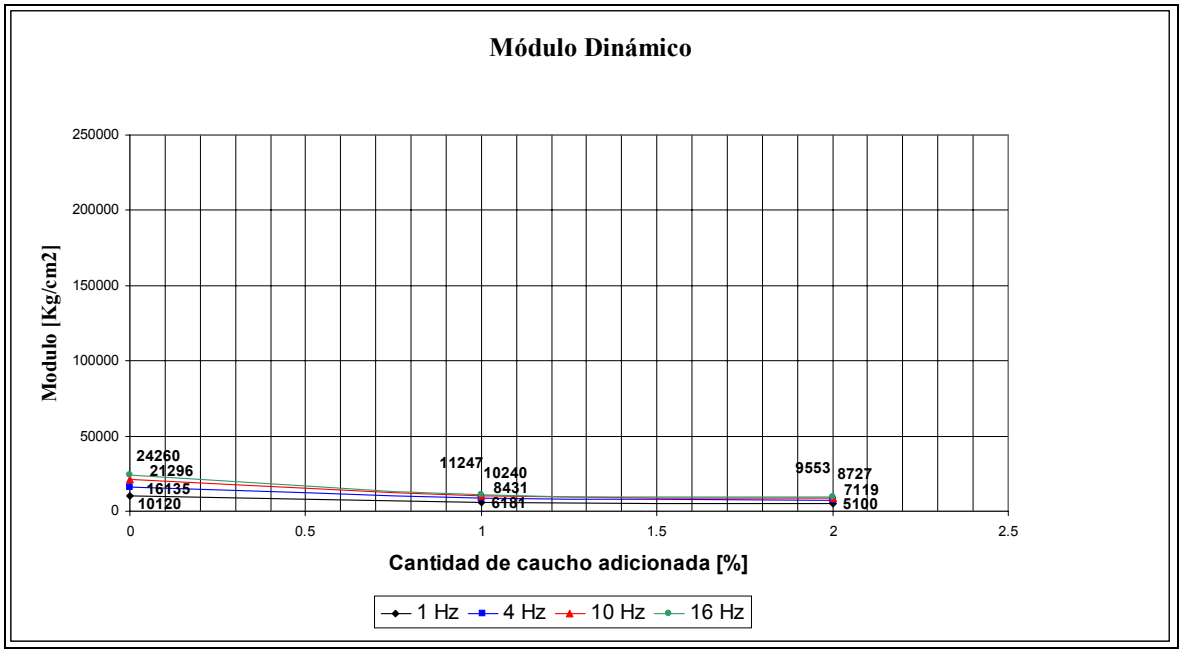


Figura 6.48. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el porcentaje de caucho, para una temperatura de 40°C, en los diseños MDC-2.

6.2.6.3 Deformación permanente. Este ensayo para evaluar la resistencia, ahuellamiento, o deformación permanente de las mezclas asfálticas fue desarrollado usando la pista de ensayo de laboratorio, Wheel-tracking Test WTT, de acuerdo con la norma española NLT 173/84.

El ensayo consiste en el desplazamiento de una pequeña rueda de caucho sólida de 2 cm de espesor y 5 cm de ancho, que tiene un movimiento lineal de un lado a otro sobre la superficie de la muestra. La frecuencia de movimiento de la rueda sobre la muestra es de 42 pasadas por minuto, y la presión de contacto de 900 kN/m^2. La resultante deformación permanente vertical en la superficie de la muestra es medida en diferentes intervalos de tiempo durante dos horas. El ensayo es realizado a una temperatura controlada de 60°C. La muestra para el ensayo consiste en una probeta cuadrada de mezcla asfáltica con dimensiones de 30 x 30 cm² y 5 cm de espesor. La probeta fue compactada en el equipo Universal controlando la altura y carga suministrada.

Fotografía 6.15. Equipo para medir la deformación permanente en mezclas asfálticas, mediante el ensayo WTT.

Con el fin de interpretar estos resultados se hace referencia de las especificaciones Españolas para la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo de laboratorio. Según la Norma NLT 173/84, conforme a la zona térmica estival y a la categoría de tráfico pesado.

Se presenta a continuación la máxima velocidad de deformación en el intervalo de 105 á 120 minutos fijada en el Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes de España.

Cuadro 6.55. Máxima velocidad de deformación en μm/min en el intervalo de 105 a 120 minutos.

Categoría de tráfico pesado	Zona térmica estival		
	Cálida	Media	Templada
T0 y T1	15		20
T2	15	20	
T3	20		-
T4	20	-	

Tomado de: http://www.carreteros.org/pg3/articulos/5/iv/a_542b.htm, última visita Julio de 2002.

A continuación se presentan las categorías de tráfico pesado definidas en la instrucción 6.1 y 2-IC en función de la intensidad media diaria de vehículos pesados (IMDp), en el carril de proyecto y en el año de la puesta en servicio.

Cuadro 6.56. categorías de tráfico pesado.

Categoría de tráfico pesado	IMDp
T0	IMDp>2000
T1	2000> IMDp>800
T2	800> IMDp>200
T3	200> IMDp>50
T4	IMDp<50

Tomado de: http://www.carreteros.org/firmes/6_1y2ic/apartados/3_1.htm, , última visita Julio de 2002.

Fotografía 6.16. Medición de la deformación permanente de una mezcla asfáltica MDC-2 con 1% de caucho.

Cuadro 6.57. Resultados Deformación permanente diseños MDC-1.

Intervalo	Velocidad de deformación			Deformación acumulada		
[min]	[μm/min]			[mm]		
Diseño	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%
30-45	20.00	20.67	56.67	1.63	2.10	3.55
75-90	14.67	8.67	30.00	2.20	2.70	4.60
105-120	14.00	7.33	31.33	2.53	3.06	5.22

Cuadro 6.58. Resultados Deformación permanente diseños MDC-2.

Intervalo	Velocidad de deformación			Deformación acumulada		
[min]	[μm/min]			[mm]		
Diseño	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%
30-45	40.00	32.67	32.67	1.53	2.70	3.80
75-90	12.67	8.67	14.67	2.23	3.28	4.40
105-120	9.33	8.67	16.00	2.50	3.55	4.82

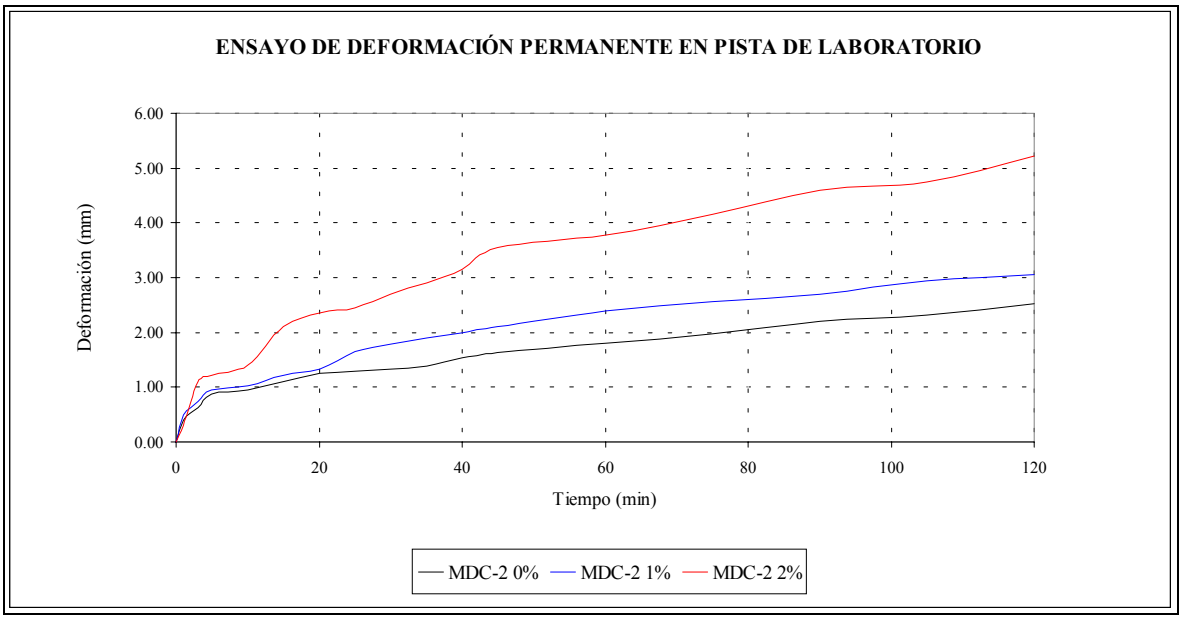


Figura 6.49. Progreso de la deformación permanente, en los diseños MDC-1.

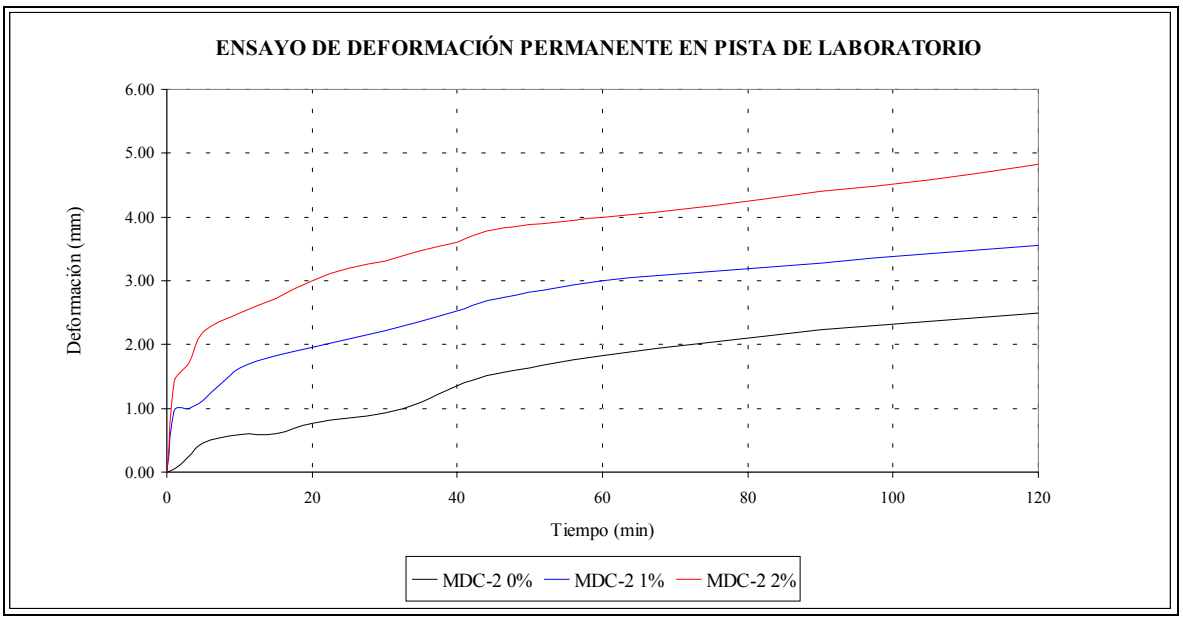


Figura 6.50. Progreso de la deformación permanente, en los diseños MDC-2.

De acuerdo con los resultados se puede observar que con mayores contenidos de caucho en la mezcla asfáltica resulta mayor la deformación permanente. En el diseño MDC-1 la deformación después de dos horas aumenta cerca de 17% con un contenido de GCR de 1%, doblando este valor para contenidos de 2%. Mientras que para el diseño MDC-2 la deformación aumenta en 30% para contenidos de GCR de 1%, siendo casi el doble para contenidos de 2%.

En cuanto a la velocidad de deformación, en el intervalo de 105 a 120 minutos esta disminuye en los diseño con 1% de GCR, comparada con la de los diseños sin caucho, siendo mas representativa para el diseño MDC-1; sin embargo aumenta casi el doble para contenidos de GCR de 2%.

Si acomodamos las especificaciones Españolas establecidas para deformación plástica a la ciudad de Bogotá, correspondería una zona térmica estival templada y una categoría de tráfico pesado T0, donde la máxima velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos se permite de 20 x 10^{-3} mm/min. Para esta especificación cumplirían todos los diseños a excepción del MDC-1 2%.

Fotografía 6.17. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 0% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

Fotografía 6.18. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 1% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

Fotografía 6.19. Ahuellamiento en una probeta MDC-1 con 2% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

Fotografía 6.20. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 0% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

Fotografía 6.21. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 1% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

Fotografía 6.22. Ahuellamiento en una probeta MDC-2 con 2% de caucho después del ensayo de Deformación permanente mediante el ensayo WTT.

6.2.6.4 Resistencia a la fatiga. El comportamiento a la fatiga se estudia por medio de ensayos de flexión realizados a 25°C y 10 Hz. El principio del ensayo se basa en someter una probeta trapezoidal a un desplazamiento sinusoidal de amplitud constante en la parte superior. Las probetas deben estar sujetas en su base inferior; en la base superior se les aplica un tren de ondas continuas sinusoidales a una amplitud dada. La ruptura se define en el momento en que la fuerza que se aplica en el extremo de la probeta se reduce a la mitad de la inicial para un desplazamiento dado. Es necesario evaluar varias amplitudes del desplazamiento para determinar la pendiente de la ley de fatiga *b*, y el valor de la deformación admisible para 10^6 ciclos ε_6.

Las probetas son de forma trapezoidal con altura de 250 mm, espesor de 25 mm y bases mayor y menor de 70 mm y 25 mm respectivamente. Estas probetas se extraen de una muestra realizada en laboratorio y compactada en el equipo Universal, de 30 x 30 cm² y 5 cm de espesor, de la cual se obtienen cuatro especímenes. Este ensayo se realizó siguiendo la norma francesa NFP-98-260.

Cuadro 6.59. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños MDC-1.

Diseño	MDC-1 0%		MDC-1 1%		MDC-1 2%	
Probeta No.	N	ε_t	N	ε_t	N	ε_t
1	342000	153E-6	5863800	100E-6	2794800	65E-6
	70200	360E-6	297600	150E-6	179400	131E-6
	18000	440E-6	20400	272E-6	118200	219E-6
2	400200	153E-6	3837000	100E-6	2794200	65E-6
	81600	360E-6	306600	150E-6	162600	131E-6
	22200	440E-6	25200	272E-6	111000	219E-6
3	453000	153E-6	3468000	100E-6	2794200	65E-6
	90600	360E-6	405000	150E-6	171600	131E-6
	15600	440E-6	24000	272E-6	115800	219E-6
4	591600	153E-6	4650000	100E-6	2616000	65E-6
	77400	360E-6	342000	150E-6	186000	131E-6
	13800	440E-6	21000	272E-6	63600	219E-6
ε_6	129E-6		131E-6		88E-6	
b	-0.324		-0.190		-0.327	
α	3.08		5.28		3.06	

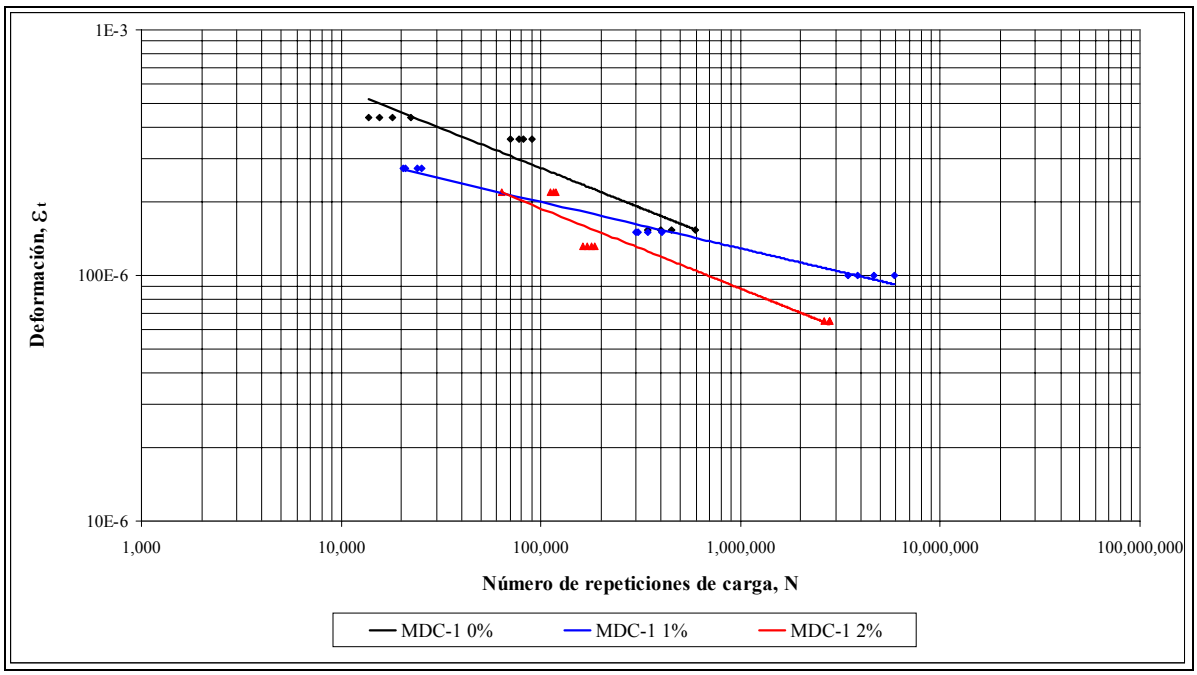


Figura 6.51. Curva de Fatiga de los diseños MDC-1.

Cuadro 6.60. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños MDC-2.

Diseño	MDC-2 0%		MDC-2 1%		MDC-2 2%	
Probeta No.	N	ε_t	N	ε_t	N	ε_t
1	496800	153E-6	11210400	100E-6	16903800	100E-6
	40200	360E-6	822000	153E-6	8589000	153E-6
	4800	440E-6	297600	220E-6	315600	245E-6
2	522000	153E-6	11349000	100E-6	16821000	100E-6
	53400	360E-6	1357200	153E-6	8589000	153E-6
	7200	440E-6	306600	220E-6	327000	245E-6
3	555000	153E-6	11100000	100E-6	11986200	100E-6
	46200	360E-6	1112400	153E-6	10170000	153E-6
	9000	440E-6	226800	245E-6	348000	245E-6
4	612000	153E-6	12672000	100E-6	15392400	100E-6
	48000	360E-6	1263000	153E-6	9114000	153E-6
	5400	440E-6	273000	245E-6	404400	245E-6
ε_6	145E-6		169E-6		199E-6	
b	-0.240		-0.220		-0.203	
α	4.16		4.56		4.92	

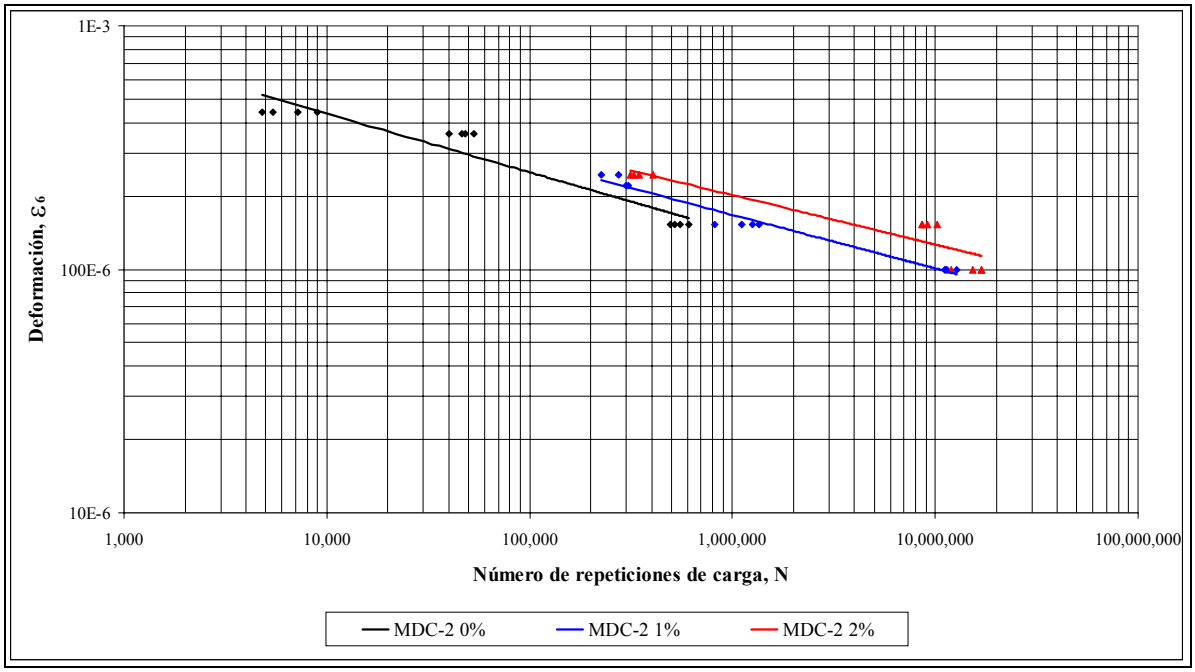


Figura 6.52. Curva de Fatiga de los diseños MDC-2.

De los resultados anteriores se puede concluir que para la vía seca la adición de GCR a las mezclas asfálticas el comportamiento a la fatiga de los diseños MDC-2 es mucho mejor que en los diseños MDC-1.

En los diseños MDC-1 mejorados con caucho, al compararlos con el diseño sin caucho, la deformación de referencia ε_6 mejora un poco para contenidos de 1% de GCR, mientras que para contenidos de 2% de caucho decrece. La pendiente de la ley de fatiga b igualmente mejora para contenidos de 1% de GCR, mientras que con 2% de GCR llega a ser muy parecida al diseño sin caucho.

En los diseños MDC-2 mejorados con caucho, al compararlos con el diseño sin caucho, la deformación de referencia ε_6 mejora a medida que se incrementa el porcentaje de GCR, al igual que la pendiente de la ley de fatiga b.

Fotografía 6.23. Probetas para el ensayo de resistencia a la fatiga.

Fotografía 6.24. Equipo para el ensayo de resistencia a la fatiga.

6.3 PROCESO POR VÍA HÚMEDA

Este proceso se llevó a cabo para estudiar las propiedades que puede adquirir y perder el cemento asfáltico al ser mezclado con las partículas de caucho, y su posterior comportamiento en las mezclas asfálticas. El objeto de modificar el ligante con GCR es el de aumentar el rango de temperatura de desempeño y la resistencia al envejecimiento del material, obtener mejores propiedades elásticas, y mejorar la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas elaboradas con el nuevo ligante.

El desarrollo del proceso húmedo se llevó a cabo siguiendo las Especificaciones típicas del Departamento de Transporte de California CALTRANS[13], Estados Unidos, en el artículo especial de California para Granulometría discontinua.

6.3.1 Granulometría de los agregados. El artículo especial de California considera granulometrías abiertas, densas y discontinuas. Estudios efectuados por CALTRANS muestran que con una granulometría discontinua y con asfalto-caucho se puede reducir el espesor de una capa hasta en un cincuenta por ciento comparada con un concreto asfáltico de granulometría densa.

De los dos usos granulométricos propuestos por CALTRANS, y presentados en el Cuadro 6.61, se utilizó la granulometría de tamaño máximo nominal de ½" en la elaboración de las mezclas asfálticas con asfalto modificado con caucho; a continuación se presenta la curva de distribución granulométrica.

[13] ESTADOS UNIDOS. California Department of Transportation. California special provision : Gap-graded Asphalt Rubber. En : Federal Highway Administration. FHWA, 1995.

Cuadro 6.61. Granulometría de Agregados recomendada por el Departamento de Transporte de California para una granulometría discontinua.

Tamiz		Tamaño Máximo Nominal	
Normal	**Alterno**	**¾"**	**½"**
19.0 mm	3/4"	-	100
12.5 mm	1/2"	90-100	90-100
9.5 mm	3/8"	60-68	79-87
4.75 mm	No. 4	32-40	32-40
2.38 mm	No. 8	18-24	18-24
595 µm	No. 30	9-12	9-12
74 µm	No. 200	2-7	2-7

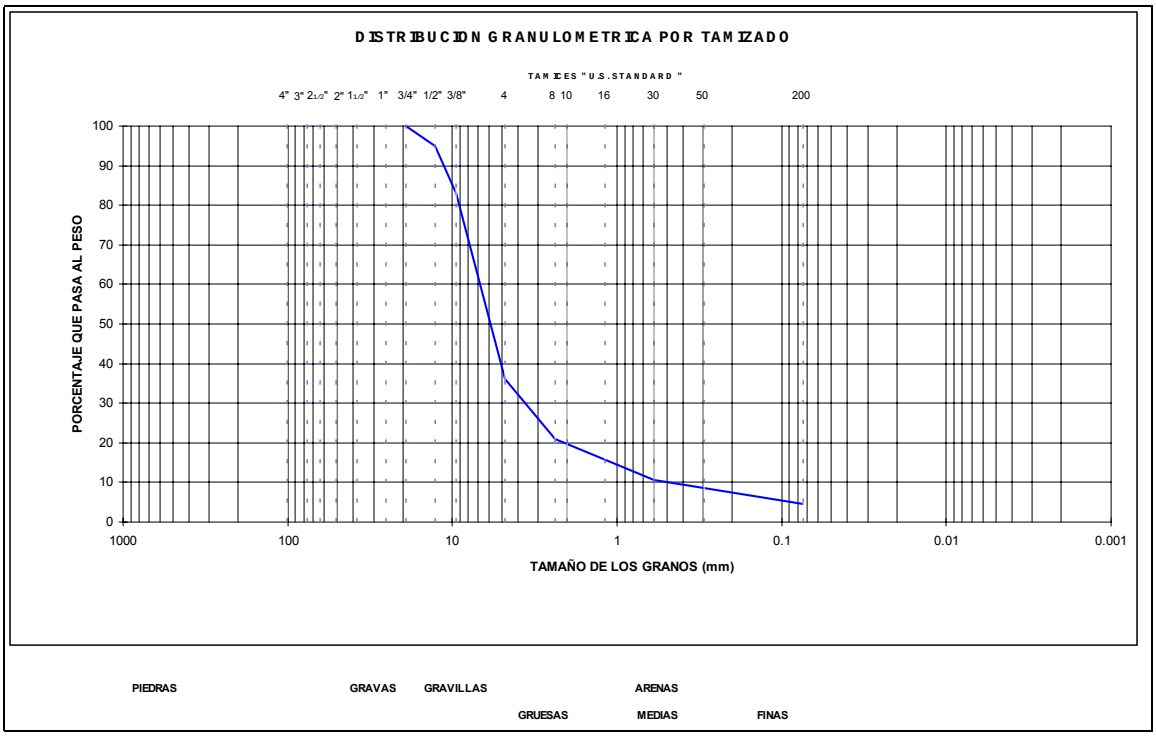


Figura 6.53. Curva granulométrica de los agregados recomendada por CALTRANS para una granulometría discontinua, para mezclas asfálticas elaboradas por la vía húmeda.

6.3.2 Granulometría del Caucho. Para la modificación del ligante con GCR, la proporción de este se encuentra entre el 14% y el 20% por peso del total de la mezcla asfalto-caucho, esta relación varía dependiendo del ligante. Debido a la irregularidad de las

partículas superiores a 2.00 mm, se decidió trabajar con tamaños inferiores al tamiz No. 30 (595 µm), utilizando el valor medio de los intervalos propuestos por CALTRANS.

A continuación se presenta en el Cuadro 6.62 la granulometría recomendada por CALTRANS, y en el Cuadro 6.63 la granulometría del GCR utilizada en la modificación del ligante.

Cuadro 6.62. Granulometría del Caucho recomendada por el Departamento de Transporte de California.

Tamiz		Porcentaje
Normal	Alterno	que pasa
2.38 mm	No. 8	100
2.00 mm	No. 10	95 – 100
1.19 mm	No. 16	40 – 80
595 µm	No. 30	5 – 30
297 µm	No. 50	0 – 15
74 µm	No. 200	0 – 3

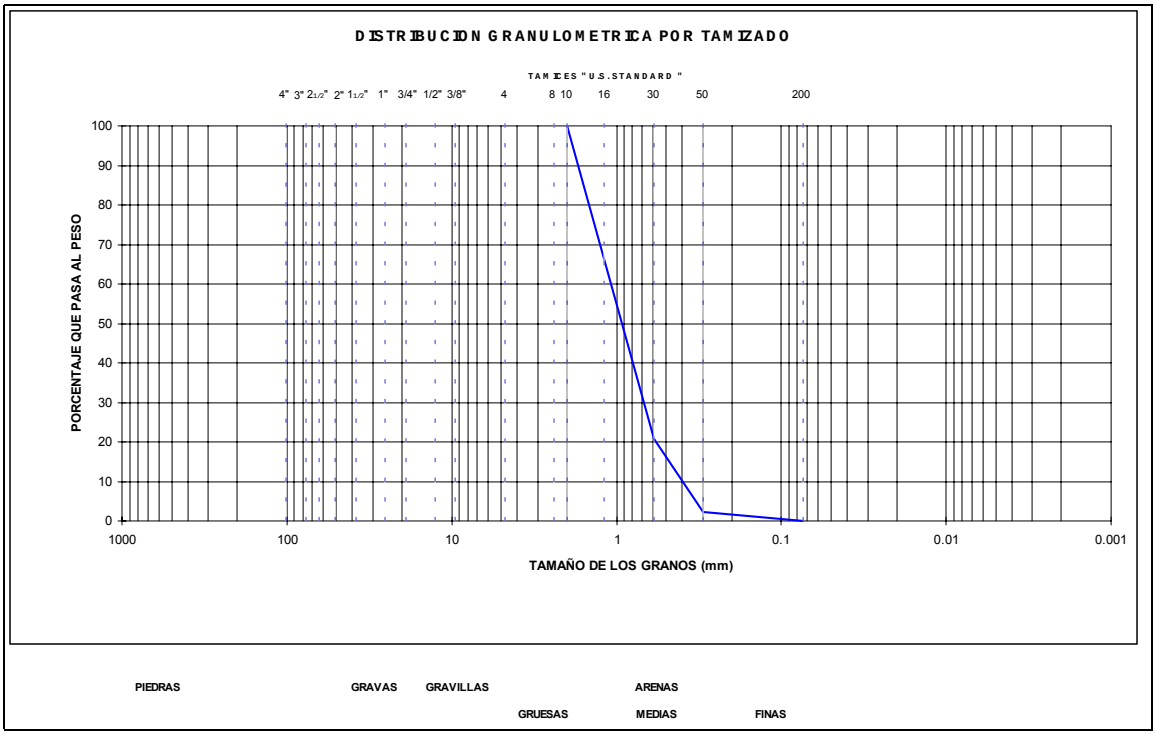


Figura 6.54. Curva granulométrica del caucho utilizada para ser incorporada a las mezclas asfálticas por medio de la vía húmeda.

Cuadro 6.63. Granulometría del Caucho utilizada en la modificación del cemento asfáltico por el proceso húmedo.

Tamiz		Porcentaje que pasa
Normal	Alterno	
595 µm	No. 30	100
297 µm	No. 50	7.5
74 µm	No. 200	1.5

Esta granulometría se utilizó en el ligante de Barrancabermeja con dos proporciones de caucho, 15% y 20%, y cuatro con el ligante de Apiay, 10%, 13%, 15 y 20% Los porcentajes de GCR son sobre el peso total de la mezcla asfalto-caucho resultante.

6.3.3 Cantidad óptima de caucho para modificar el ligante. La cantidad óptima de GCR será aquella que proporcione a la mezcla asfalto-caucho una viscosidad Brookfield a 163°C entre 1500 y 3000 cP después de un determinado tiempo y temperatura de mezclado.

6.3.4 Cantidad óptima de ligante modificado con GCR. La cantidad de cemento asfáltico requerida se determinó mediante la realización de tres probetas de mezcla asfáltica elaboradas cada una con diferentes porcentajes de asfalto-caucho. Las probetas se compactaron en la máquina de cizallamiento giratorio PCG, con un ángulo de giro de un grado, y un total de ochenta giros, de acuerdo con las especificaciones francesas AFNOR para este tipo de mezcla. Se evaluaron los módulos dinámicos y el porcentaje de vacíos con aire; con estos parámetros se escogió el porcentaje óptimo de asfalto. El criterio de selección recomendado por CALTRANS para encontrar la cantidad óptima de ligante modificado con GCR es el contenido de vacíos en la mezcla total, el cual debe ser de 3.0%.

6.3.5 Metodología. Se trabajó con dos tipos de cemento asfáltico, de Apiay y Barrancabermeja; y varios porcentajes de adición de caucho relacionados con el peso total de la mezcla asfalto-caucho resultante. Otras dos variables fueron el tiempo de reacción o de reacción del caucho con el asfalto, y la temperatura de mezclado del asfalto-caucho.

Fotografía 6.25. Aspecto de la mezcla asfalto caucho en el proceso de mezclado; corresponde a un cemento asfáltico de Apiay con 10% de caucho a 155°C.

Con el ligante de Barrancabermeja se trabajaron porcentajes de 15% y 20%, y con Apiay 15% y 20% inicialmente, ya que con estos contenidos de ligante no se logró la viscosidad buscada, por consiguiente se decidió trabajar dos porcentajes adicionales de 10% y 13%. La escogencia de los porcentajes de caucho se basó en las experiencias registradas para este proceso, las cuales muestran que la cantidad requerida de GCR para modificar el ligante se encuentra entre 14% y 20%.

Las temperaturas de mezclado analizadas fueron 155ºC y 165ºC, ya que según la literatura revisada, el caucho reacciona con el cemento asfáltico en un intervalo de temperaturas entre

los 150 y 205°C; se escogieron temperaturas bajas por razones basadas en las características de los ligantes colombianos, y por motivos económicos en el proceso de mezclado en planta. Los tiempos de reacción escogidos fueron de 45, 50, 55, 60, 70 y 80 minutos, puesto que la experiencia ha demostrado que el caucho debe reaccionar con el cemento asfáltico un tiempo mínimo de 45 minutos hasta una ó dos horas. La energía de agitación se estableció en 100 rpm.

Fotografía 6.26. Control de la temperatura en el proceso de mezclado del cemento asfáltico con el caucho.

La mezcla del cemento asfáltico con el GCR se realizó en un recipiente metálico, el cual fue introducido en un baño de aceite térmico para calentar la mezcla a las temperaturas requeridas. La mezcla asfalto-caucho fue agitada constantemente mediante un sistema de aspas metálicas a una velocidad de 100 rpm, garantizando su homogeneidad.

Se elaboró una sola mezcla para la combinación de las variables tipo de ligante, cantidad de GCR, y temperatura de mezclado. La variable tiempo de reacción se controló tomando muestras durante el proceso de mezclado en el tiempo requerido por el diseño.

Fotografía 6.27. Equipo de mezclado del cemento con GCR.

Fotografía 6.28. Muestras de cemento asfáltico de Apiay con 10% de caucho después del proceso de mezclado, cada una corresponde a un tiempo de reacción diferente.

La combinación de las cuatro variables dio como resultado 72 mezclas asfalto-caucho, de las cuales se escogió la mejor de Apiay y Barrancabermeja. La mejor mezcla asfalto-caucho se seleccionó teniendo en cuanta el criterio de viscosidad Brookfield a 163°C, el tiempo de reacción, y la temperatura de mezclado.

6.3.6 Ensayos realizados al ligante. Como se mencionó anteriormente, en el desarrollo del proceso húmedo se trabajó con cemento asfáltico de Apiay y Barrancabermeja. Igual que a los ligantes no modificados, estos también se sometieron a procesos de envejecimiento en el horno de película delgada en movimiento RTFO y en la cámara de envejecimiento a presión PAV. Se realizaron los siguientes ensayos:

- Viscosidad Brookfield a 163°C.
- Curva reológica.
- Medición de propiedades reológicas o caracterización viscoelástica mediante el Reómetro de Corte Dinámico.
- Medición de propiedades reológicas mediante el Reómetro de viga a flexión para el residuo del PAV.
- Ductilidad.
- Penetración.
- Punto de ablandamiento.
- Densidad.

6.3.6.1 Viscosidad Brookfield. La medición de la viscosidad es requerida, entre otras cosas, para investigar la capacidad de bombeo del ligante modificado con GCR. Si la viscosidad es demasiado baja pueden ocurrir inconvenientes de flujo de la mezcla asfalto-caucho, y si es demasiado alta no podrá ser bombeada. La adición de caucho al cemento asfáltico causa un aumento en la viscosidad del ligante resultante, por consiguiente a cada una de las mezclas asfalto-caucho se le realizaron ensayos de viscosidad aparente

Brookfield. Según las especificaciones de CALTRANS, el parámetro de la viscosidad Brookfield a 163°C debe usarse para evaluar el ligante modificado con GCR. Esta viscosidad debe estar entre 1500 cP y 3000 cP.

Para el cemento asfáltico de Apiay y Barrancabermeja se trabajó inicialmente con porcentajes de adición de caucho de 15% y 20% sobre el peso del ligante. Como se podrá ver en los resultados de viscosidad para 15% y 20% de adición de GCR en el ligante de Apiay, Cuadro 6.66 y Cuadro 6.67, los valores de viscosidad resultaron ser muy altos, por encima de 3000 cP, por lo que se decidió probar un porcentaje mas bajo, de 10%, el cual resultó con viscosidades por debajo de 1500 cP. Finalmente se probó un último porcentaje, de 13%, que arrojó valores de viscosidad en el intervalo buscado.

Estos valores de viscosidad corresponden al promedio de las tres últimas viscosidades tomadas después de diez minutos de dejar que la mezcla asfalto-caucho se estabilizara térmicamente. Este ensayo se realizó según la norma ASTM D 4402-87.

Fotografía 6.29. Viscosímetro Rotacional Brookfield Modelo RVTDV - II.

Cuadro 6.64. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 10% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
A-10-155	800	600	1400	1200	1400	1400
A-10-165	1000	600	1200	1200	1600	600

Cuadro 6.65. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 13% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
A-13-155	1400	1200	1600	2000	1200	1200
A-13-165	1667	2000	2400	1600	3400	2800

En el siguiente gráfico, para el diseño A-10, se puede observar que sólo el diseño A-10-165-70 tuvo un valor de viscosidad dentro del intervalo deseado. Estos valores se obtuvieron a 20 rpm utilizando el disco número 7.

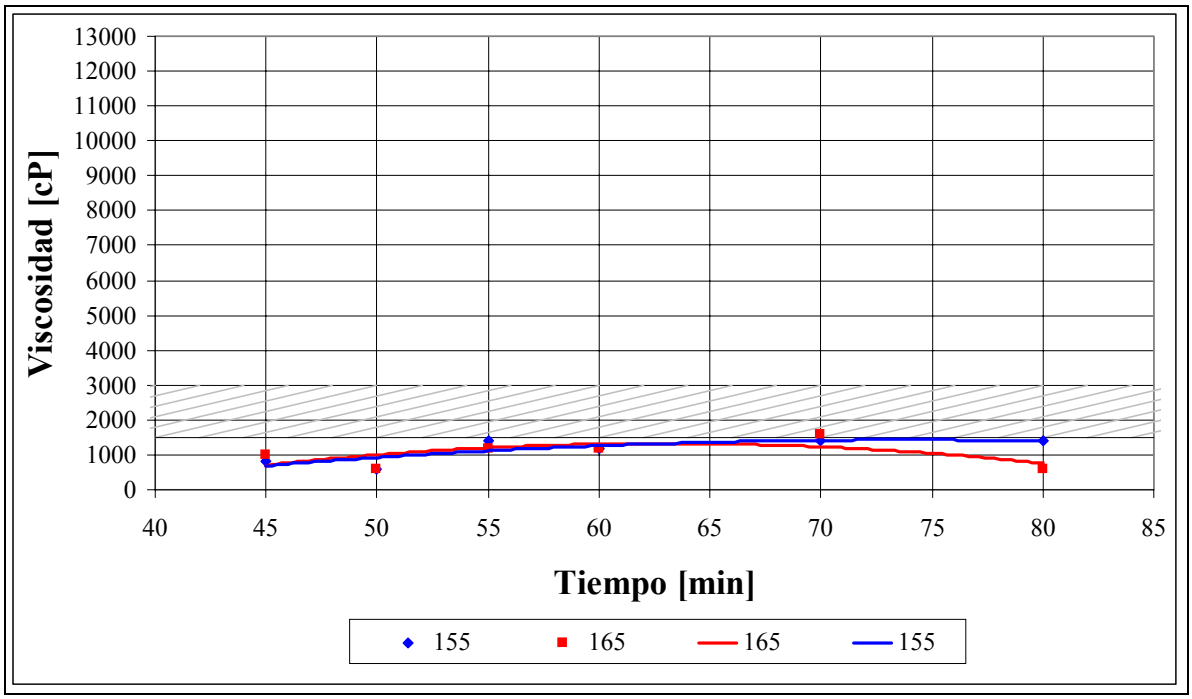


Figura 6.55. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-10.

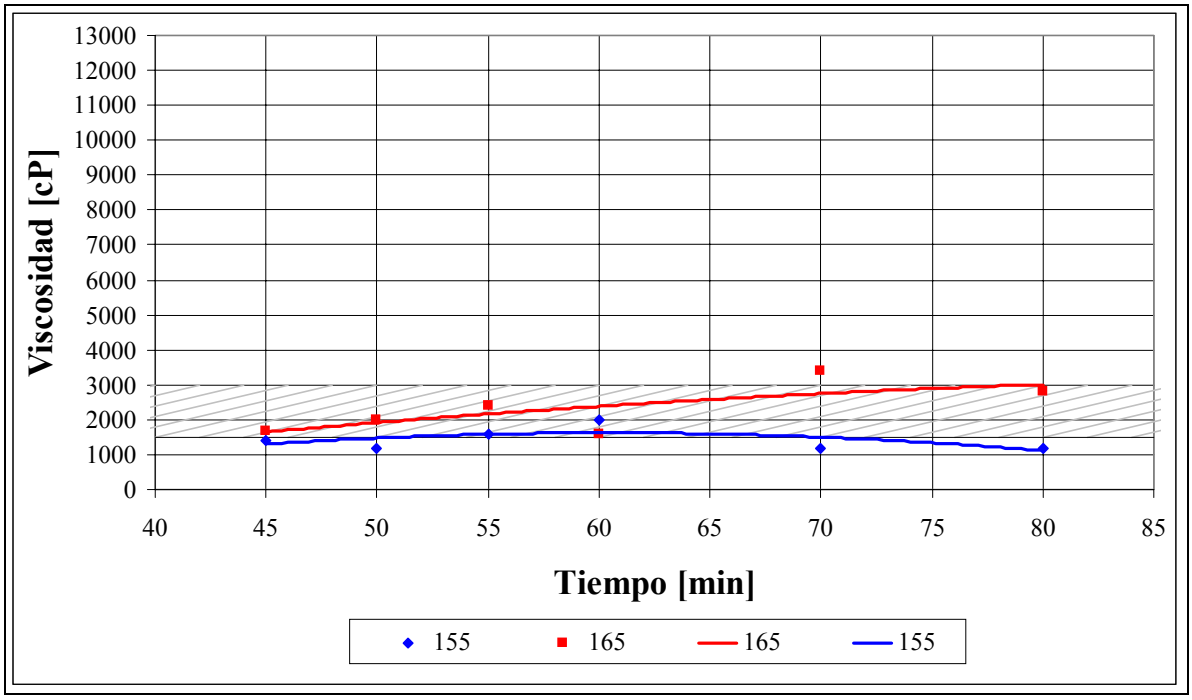


Figura 6.56. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-13.

Para el diseño A-13, se observa que los diseños A-13-155-55, A-13-155-60, y todos los diseños de A-13-165 a excepción de A-13-165-70 lograron valores de viscosidad dentro del intervalo deseado. Estos valores se obtuvieron a 20 rpm utilizando el disco número 7.

Cuadro 6.66. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 15% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
A-15-155	3800	4000	5200	5200	6667	3867
A-15-165	4867	4667	5267	4000	3867	5467

Cuadro 6.67. Resultados de viscosidad Brookfield para Apiay con 20% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
A-20-155	5200	8400	6000	9400	10267	7600
A-20-165	7933	7800	6000	12200	10600	9200

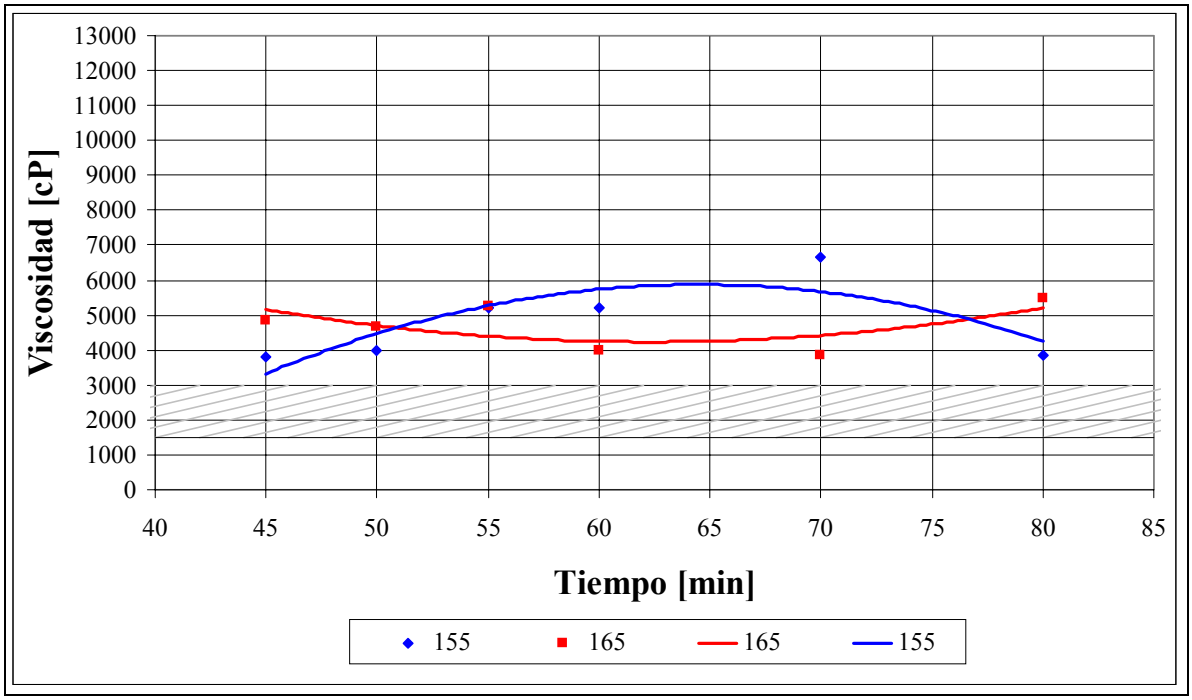


Figura 6.57. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-15.

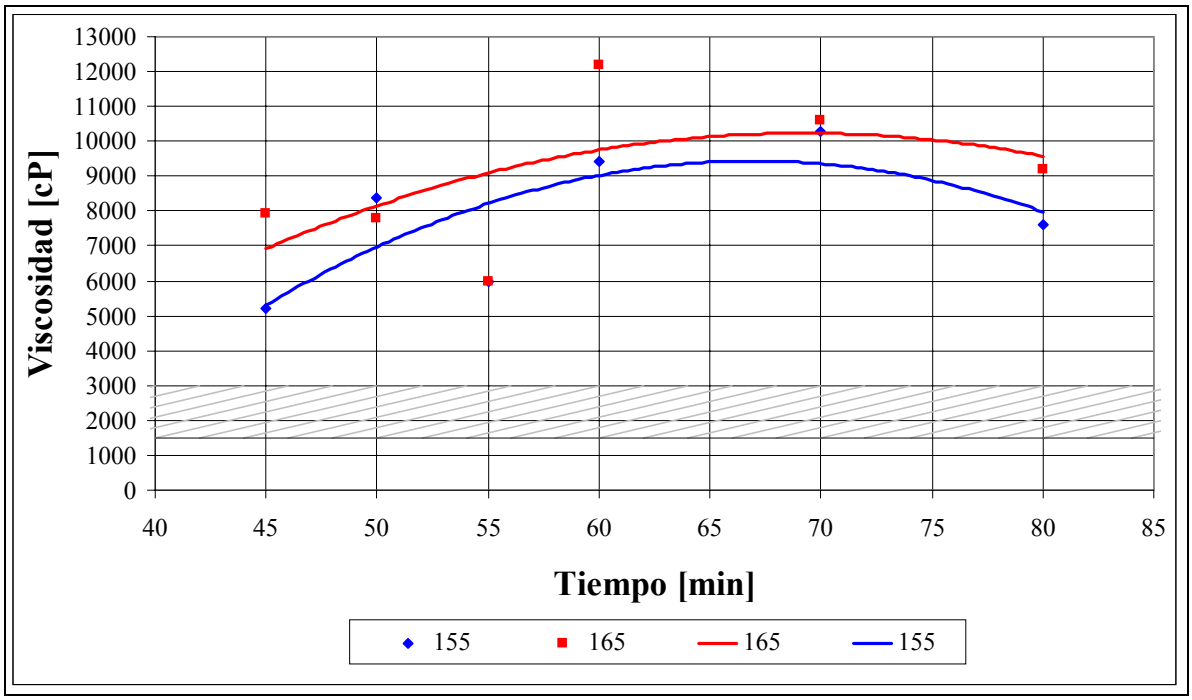


Figura 6.58. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño A-20.

Se puede observar que ninguno de los diseños obtuvo un valor de viscosidad dentro del intervalo deseado. Estos valores se obtuvieron a 20 rpm utilizando el disco número 7.

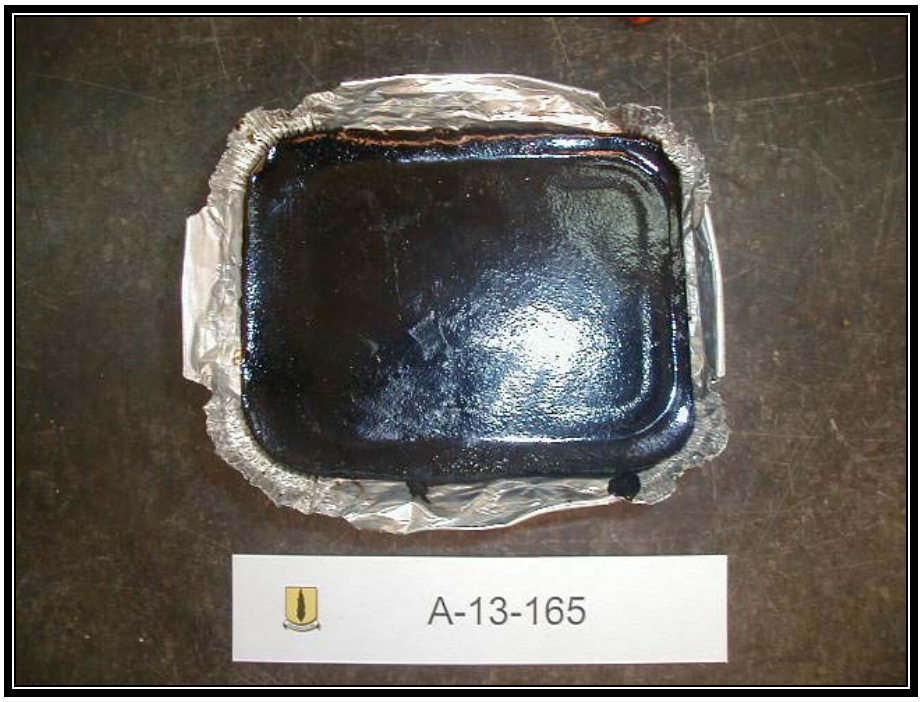
En las siguientes fotografías se podrá observar el aspecto de las diferentes mezclas asfalto-caucho elaborados con el cemento asfáltico de Apiay. Para altos contenidos de GCR el ligante modificado presenta una consistencia bastante grumosa, esta formación de grumos se debe al caucho adicionado, haciendo al ligante más viscoso.

El porcentaje de GCR con el que se modificó el ligante, y con el que se obtuvieron valores de viscosidad entre 1500 y 3000 cP fue de 13%. Mayores porcentajes de GCR lograron viscosidades muy altas, y menores contenidos de este obtuvieron valores por debajo de 1500 cP.

Fotografía 6.30. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 10% de Caucho a 155°C.

Fotografía 6.31. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 10% de Caucho a 165°C.

Fotografía 6.32. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 155°C.



Fotografía 6.33. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 165°C.

Fotografía 6.34. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 15% de Caucho a 155°C.

Fotografía 6.35. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 15% de Caucho a 165°C.

Fotografía 6.36. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 20% de Caucho a 155°C.

Fotografía 6.37. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 20% de Caucho a 165°C.

A continuación se presentan los diseños elaborados con cemento asfáltico de Barrancabermeja. Todos los valores de viscosidad en los diseños con 15% de GCR se encuentran dentro del rango deseado, situación que no se presenta en los dos diseños con 20% de GCR. Estos valores se obtuvieron a 20 rpm utilizando el disco número 7.

Cuadro 6.68. Resultados de viscosidad Brookfield para Barrancabermeja con 15% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
B-15-155	2200	2467	2000	2800	2533	1800
B-15-165	2133	1867	1867	2467	1933	2267

Cuadro 6.69. Resultados de viscosidad Brookfield para Barrancabermeja con 20% de caucho a 155 y 165°C.

Tiempo [min.]	45	50	55	60	70	80
Código	Viscosidad Brookfield [cP]					
B-20-155	5200	8400	6000	9400	10267	7600
B-20-165	7933	7800	6000	12200	10600	9200

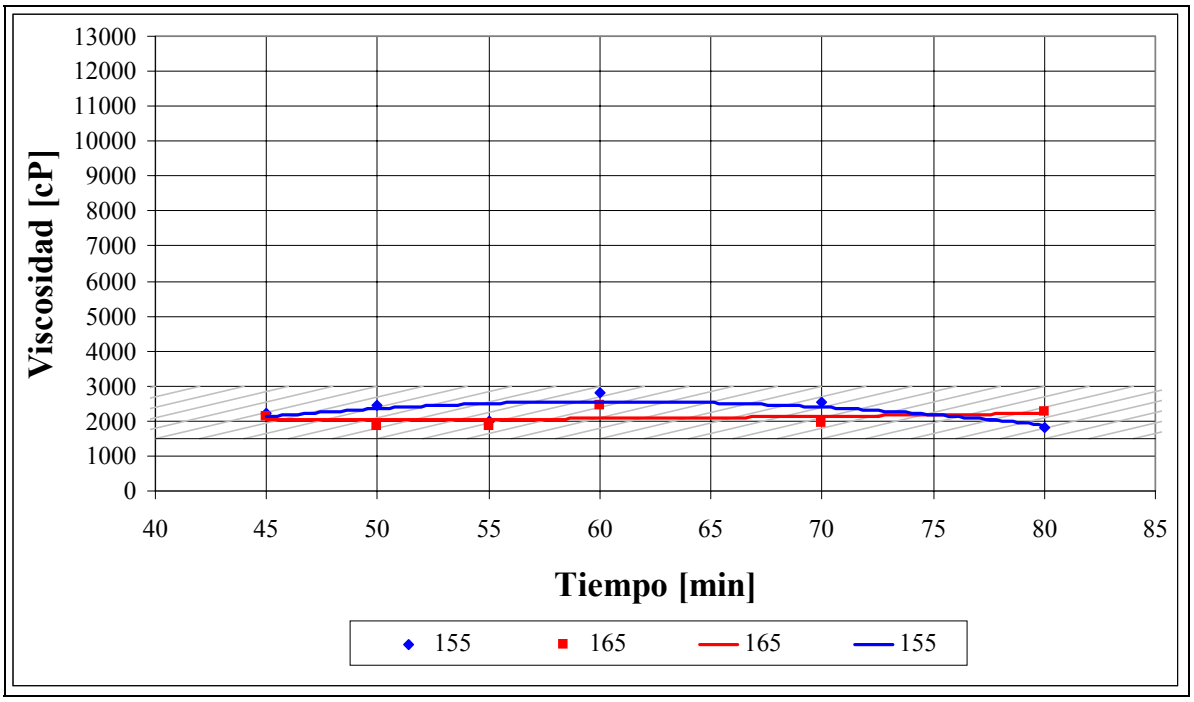


Figura 6.59. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño B-15.

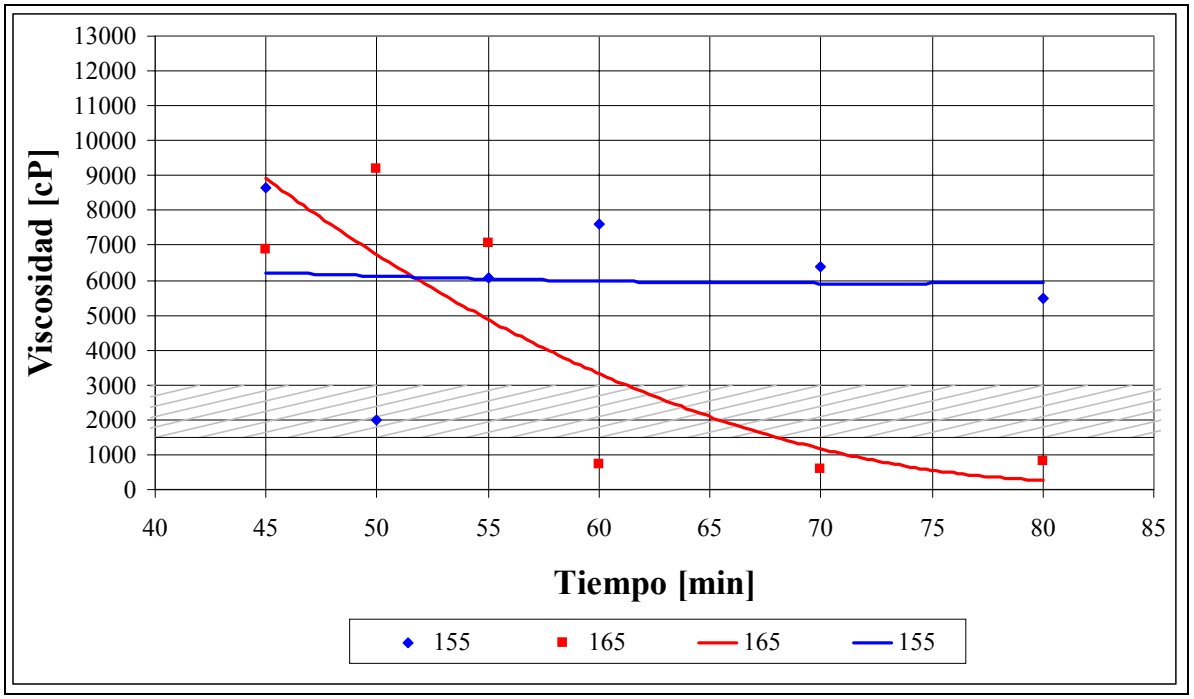


Figura 6.60. Variación de la viscosidad Brookfield con el tiempo de reacción caucho-cemento asfáltico a 155 y 165°C, diseño B-20.

Fotografía 6.38. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 155°C.

Fotografía 6.39. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 165°C.

Fotografía 6.40. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 20% de Caucho a 155°C.

Fotografía 6.41. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 20% de Caucho a 165°C.

6.3.6.2 Ligantes modificados con GCR seleccionados. A medida que se incrementa la proporción adicionada de GCR al ligante, la mezcla asfalto-caucho se hace mas viscosa. De acuerdo a los anteriores resultados se escogieron los siguientes diseños:

Para el cemento asfáltico de Apiay se escogió el diseño A-13-165-55 que corresponde a un ligante con 13% de caucho, en el cual el cemento asfáltico reaccionó con el caucho a una temperatura de 165°C por 55 minutos. Este diseño se escogió porque presenta un valor de viscosidad que se encuentra entre 1500 y 3000 cP y porque la variación de la viscosidad con los tiempo de reacción analizados se mantiene dentro del intervalo especificado. Para el cemento asfáltico de Barrancabermeja se escogió el diseño B-15-155-50 que corresponde a un ligante con 15% de caucho, en el cual el cemento asfáltico reaccionó con el caucho a una temperatura de 155°C por 50 minutos. Dado que todos los diseños B-15 presentaron valores de viscosidad entre el intervalo buscado, se escogió el diseño B-15-155-50 por presentar la menor temperatura de mezclado y por lograr un valor de viscosidad aceptable en un menor tiempo.

Fotografía 6.42. Cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de Caucho a 165°C con un tiempo de reacción de 55 min., diseño A-13-165-55.

Fotografía 6.43. Cemento asfáltico de Barrancabermeja modificado con 15% de Caucho a 155°C con un tiempo de reacción de 50 min., diseño B-15-155-50.

Se concluye que el ligante de Apiay requiere menos contenido de GCR que Barrancabermeja para alcanzar los mismos valores de viscosidad Brookfield a 163°C.

6.3.6.3 Curva reológica del ligante modificado con GCR. A continuación se presentan los valores de viscosidad para los dos ligantes modificados con GCR, tanto en su estado original como envejecido en RTFO y PAV. Estos valores de viscosidad corresponden al promedio de las tres últimas viscosidades tomadas después de diez minutos requeridos para que la mezcla asfalto-caucho se estabilizara térmicamente. Este ensayo se realizó según la norma ASTM D 4402-87.

Los resultados de viscosidad obtenidos después del PAV no fueron los esperados, ya que deberían ser valores por encima de los obtenidos con el residuo del RTFO, al menos viscosidades mas altas que el ligante en estado original. Todos los valores se obtuvieron a 20 rpm utilizando el disco número 7.

Los resultados que se presentan en el Cuadro 6.70 y el Cuadro 6.71 corresponden a los valores de viscosidad Brookfield para el ligante A-13-166-55 y B-15-155-50 respectivamente.

Cuadro 6.70. Resultados de viscosidad Brookfield para el diseño A-13-165-55.

Temperatura [°C]		90	120	140	160
Código	Referencia	Viscosidad Brookfield [cP]			
A-13-165-55	Original	129000	14600	4200	2600
	RTFO	405000	52500	16533	5800
	PAV	105000	9600	2400	1000

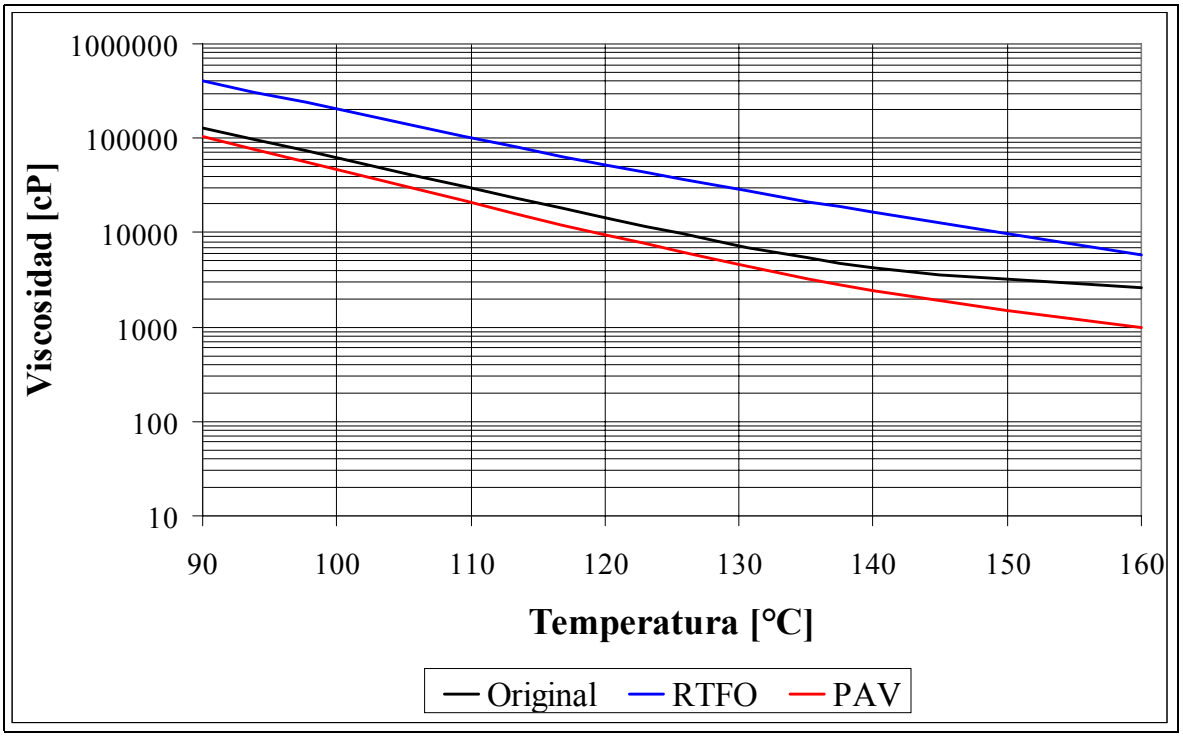


Figura 6.61. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el diseño A-13-165-55.

Cuadro 6.71. Resultados de viscosidad Brookfield para el diseño B-15-155-50.

Temperatura [°C]		90	120	140	160
Código	Referencia	Viscosidad Brookfield [cP]			
B-15-155-50	Original	70000	7000	2600	1800
	RTFO	181000	22600	8000	3400
	PAV	989400	55000	12200	3000

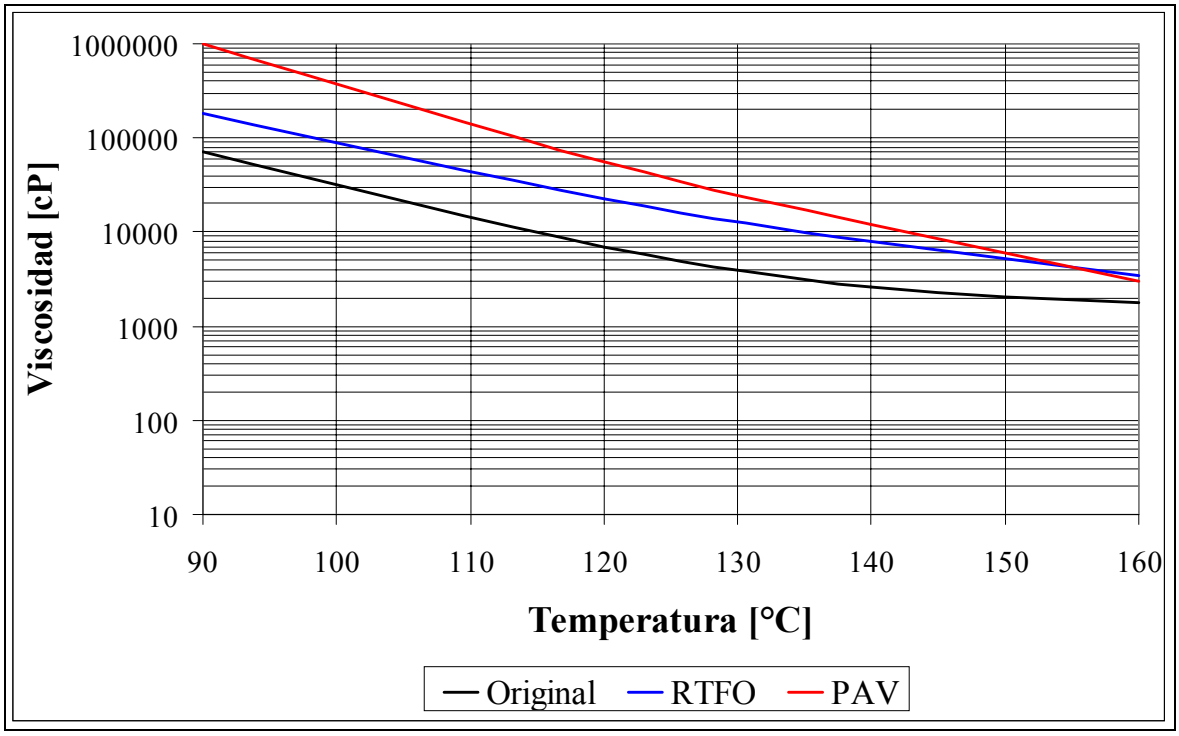


Figura 6.62. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para el diseño B-15-155-50.

La viscosidad Brookfield de los ligantes modificado con GCR son mucho más altas que la de los ligantes sin modificar, esto se debe a que el caucho cambia las propiedades de la mezcla resultante tanto por la adición del mismo como por el proceso de modificación al someter al ligante a altas temperaturas por largos periodos de tiempo.

A una temperatura aproximada de 120°C la tendencia de la curva que muestra la variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura cambia en el ligante con GCR respecto a la tendencia que mostraba el ligante antes de ser modificado, esto puede deberse a que a bajas temperaturas la viscosidad medida es la de la mezcla asfalto-caucho y a altas temperaturas es la de las partículas de caucho dispersas en el ligante que presenta poca viscosidad.

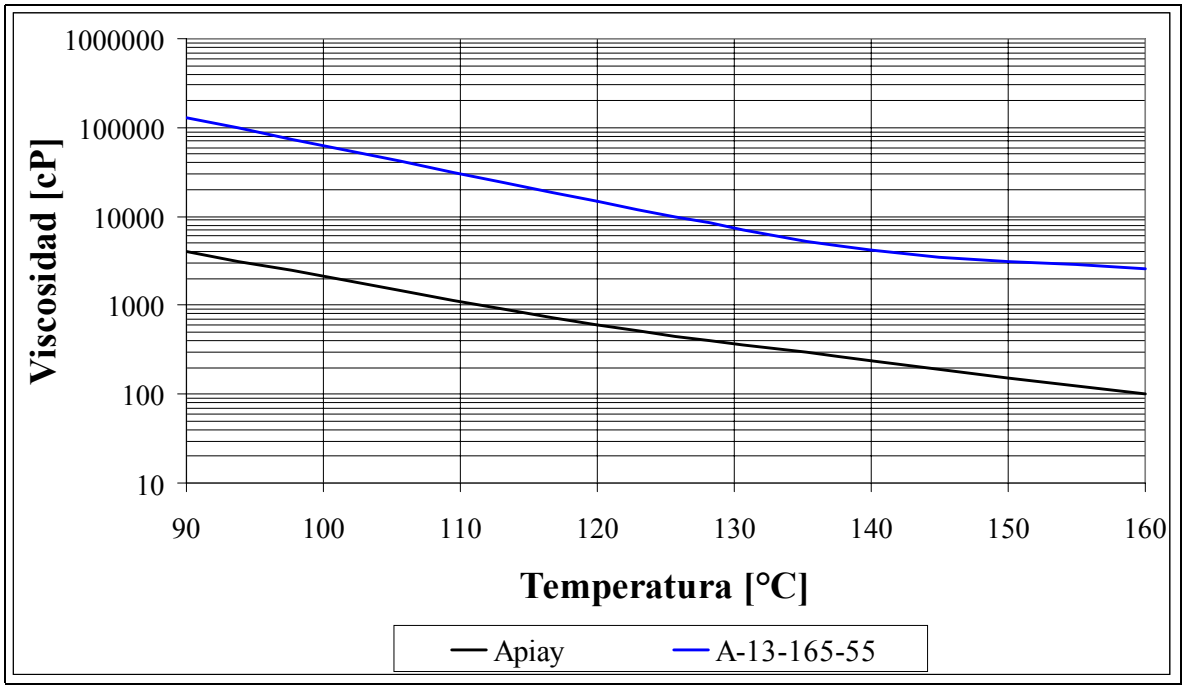


Figura 6.63. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para los ligantes originales de Apiay sin modificar y modificado.

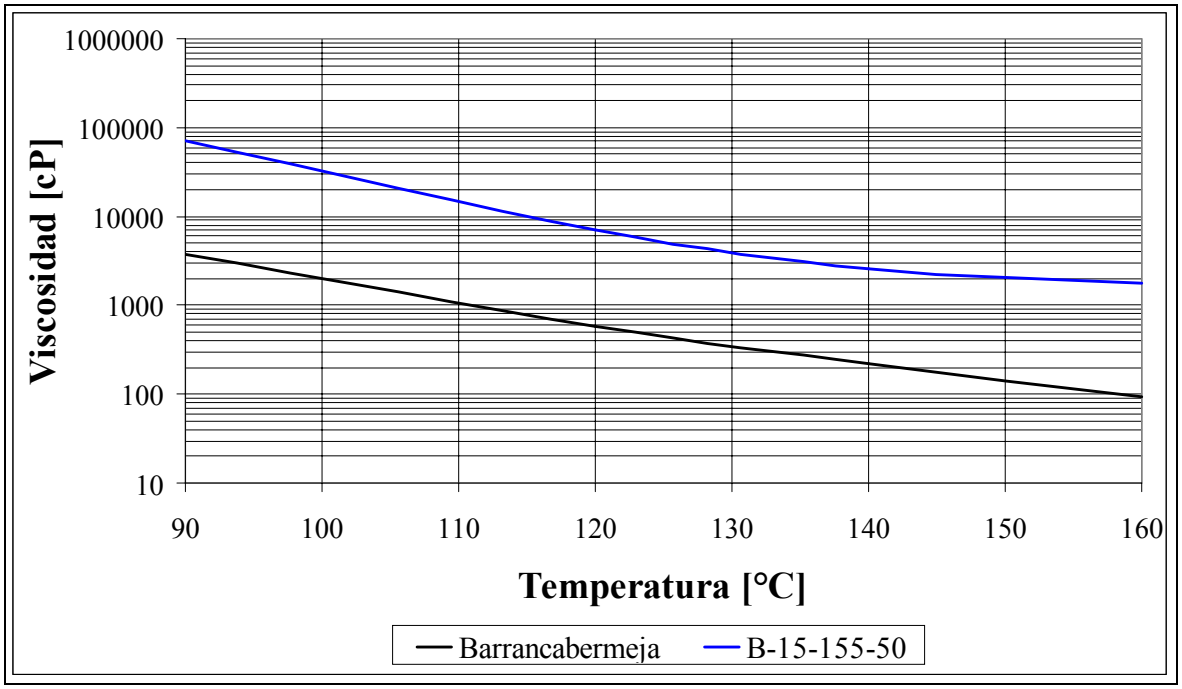


Figura 6.64. Variación de la viscosidad Brookfield con la temperatura para los ligantes originales de Barrancabermeja sin modificar y modificado.

6.3.6.4 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de corte dinámico – DSR.

Al igual que a los ligantes de Apiay y Barrancabermeja sin modificar, a estos dos cementos asfálticos modificados con GCR se ensayaron bajo barrido de temperaturas, deformaciones y frecuencias. Este ensayo se realizó según la norma AASHTO TP5-98.

Con los resultados obtenidos se evalúa la relación G*/senoδ la cual debe ser como mínimo 1kPa para ligantes originales y 2.2 kPa para ligantes envejecidos en RTFO. Al ligante envejecido en PAV se evalúa la relación G*senoδ la cual debe ser como máximo 5000 kPa.

Cuadro 6.72. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de A-13-165-55 y B-15-155-50 originales.

Parámetro	Temperatura	A-13-165-55	B-15-155-50
δ [grados]	64°C	61.3	68.3
G*/senoδ [kPa]		7.68	3.94
δ [grados]	70°C	63.6	68.2
G*/senoδ [kPa]		4.47	2.24
δ [grados]	76°C	66.0	67.9
G*/senoδ [kPa]		2.72	1.44
δ [grados]	82°C	67.8	67.5
G*/senoδ [kPa]		1.83	0.82
δ [grados]	88°C	70.0	-
G*/senoδ [kPa]		1.05	-

Cuadro 6.73. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos de A-13-165-55 y B-15-155-50 después del RTFO.

Parámetro	Temperatura	A-13-165-55	B-15-155-50
δ [grados]	64°C	52.3	65.9
G*/senoδ [kPa]		26.47	7.66
δ [grados]	70°C	53.3	67.2
G*/senoδ [kPa]		17.75	4.13
δ [grados]	76°C	54.9	68.8
G*/senoδ [kPa]		10.82	2.30
δ [grados]	82°C	57.2	70.6
G*/senoδ [kPa]		6.79	1.31
δ [grados]	88°C	56.1	-
G*/senoδ [kPa]		4.27	-

Cuadro 6.74. Resultados de caracterización viscoelástica en el DSR para los cementos asfálticos A-13-165-55 y B-15-155-50 después del PAV.

Parámetro	Temperatura	A-13-165-55	B-15-155-50
G*senoδ [kPa]	31°C	751.15	744.2
	28°C	1189.3	1130.1
	25°C	1796.9	1735.8
	22°C	2614.0	2629.4
	19°C	3537.7	3845.3
	16°C	5076.3	5380.7

Con el fin de analizar la modificación del ligante al adicionársele GCR se comparara en las Figuras 6.68 y 6.69 los ligantes Apiay con A-13-165-55 y Barrancabermeja con B-15-155-50; de este análisis se concluye que tanto en estado original y después del RTFO los ligantes modificados se muestran más rígidos y con componentes elásticas mayores que los ligantes puros. En estas figuras también se podrá observar que el ligante de Apiay con un menor porcentaje de GCR logra ser más rígido y tener una componente elástica mayor que el ligante de Barrancabermeja.

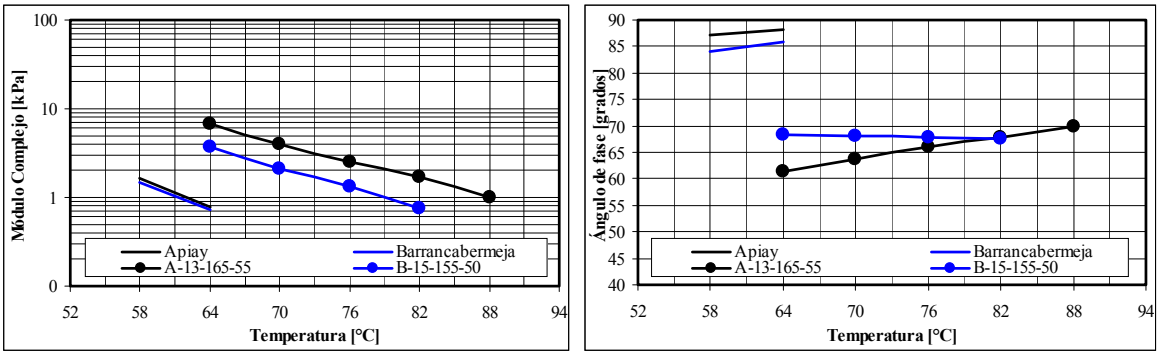


Figura 6.65 Variación de las propiedades reológicas al modificar los ligantes de Apiay y Barrancabermeja con GCR. Ligantes en estado original.

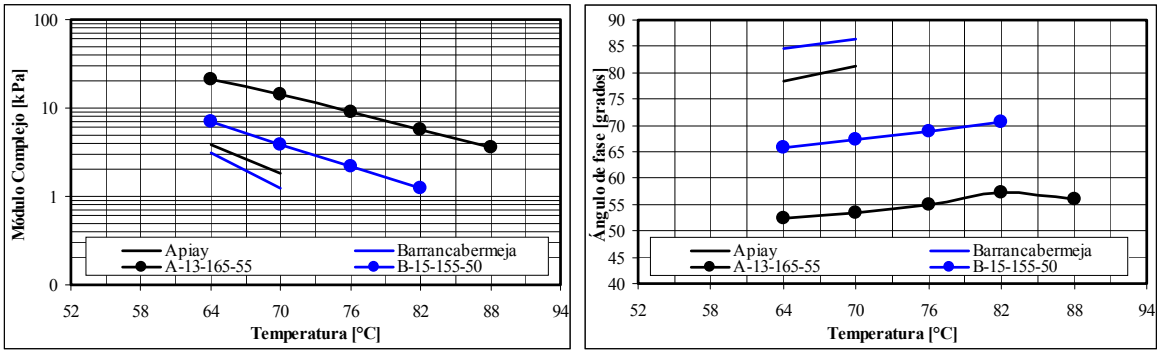


Figura 6.66 Variación de las propiedades reológicas al modificar los ligantes de Apiay y Barrancabermeja con GCR. Ligantes después del RTFO.

Los dos Figuras siguientes muestran la modificación que sufre el ligante al ser sometido al proceso de envejecimiento en el RTFO.

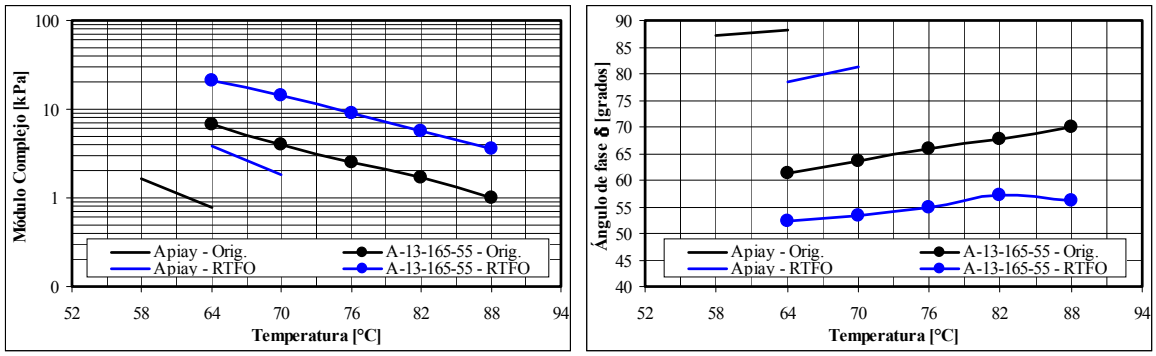


Figura 6.67 Cambios de los ligantes Apiay y A-13-165-55 al ser sometidos al RTFO.

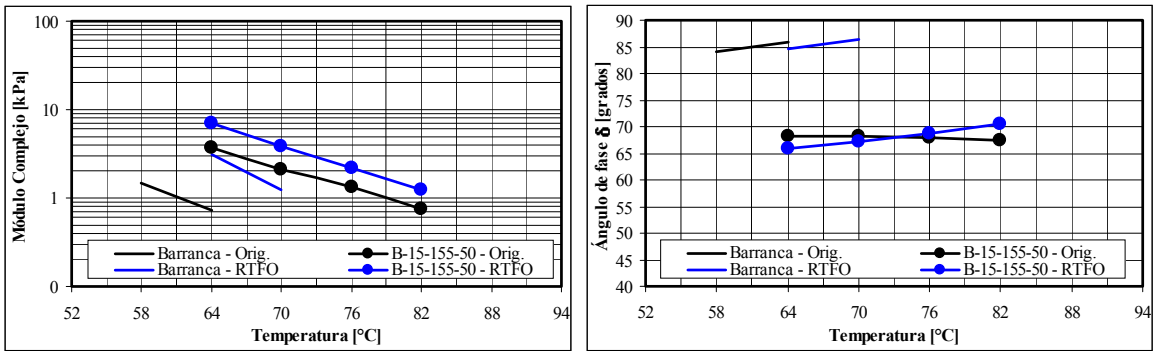


Figura 6.68 Cambios de los ligantes Barrancabermeja y B-15-155-50 al ser sometidos al RTFO.

6.3.6.5 Caracterización viscoelástica, usando un reómetro de viga a flexión –BBR. Como se mencionó en el aparte del BBR para los ligantes sin modificar, este ensayo se realiza para ligantes después de ser envejecidos en el PAV. Según el criterio de selección, a los 60 segundos de ensayo la máxima rigidez a la fluencia debe ser de 300 MPa y el mínimo valor-m 0.30.

Este ensayo se realizó en los laboratorios de TexPar Energy inc, en Claremore Estados Unidos, de acuerdo a la norma AASHTO TP1-98.

Cuadro 6.75. Resultados de caracterización viscoelástica en el BBR para los cementos asfálticos A-13-165-55 y B-15-155-50 después del PAV.

Parámetro	Temperatura	A-13-165-55	B-15-155-50
s(t)	-6°C	63.5	-
m(t)		0.314	-
s(t)	-12°C	117.0	131.5
m(t)		0.290	0.312
s(t)	-18°C	-	249.0
m(t)		-	0.285

En los resultados anteriores se observa que el ligante B-15-155-50 cumple con la especificación para m(t) a una temperatura más baja que el ligante A-13-165-55, sin embargo, a una misma temperatura presenta un valor de rigidez un poco mayor. Con estos resultados se concluye que ambos ligantes pueden ser útiles para resistir al fisuramiento térmico, puesto que A-13-165-55 ofrece menor acumulación de esfuerzos, y B-15-155-50 mejor relación de esfuerzos. Sin embargo, según la clasificación Superpave, el grado de desempeño del ligante B-15-155-50 cubre un rango de bajas temperaturas más amplio.

6.3.6.6 Ensayos Convencionales a los ligantes modificados con GCR. A continuación se presentarán los resultados a los ensayos de ductilidad, penetración, punto de ablandamiento y densidad realizados a los dos ligantes modificados con GCR realizados tanto al ligante original como al envejecido en RTFO y PAV. Las respectivas normas con las cuales se realizaron los ensayos se relacionan en el cuadro de resultados.

El ensayo de recuperación elástica se realizó en los laboratorios de TexPar Energy inc, en Claremore Estados Unidos.

Cuadro 6.76. Resultados de ensayos convencionales sobre cemento asfáltico modificado con GCR.

Código	Ductilidad [25ºC]	Recuperación elástica [25ºC, 50 mm/min, 20 cm]	Penetración [25ºC, 100 g, 5 s]	Punto de ablandamiento	Densidad [25ºC]	Pérdida de masa
	INV E-702	ASTM T-301-95	INV E-706	INV E-712	INV E-707	INV E-720
	[cm]	[%]	[1/10 mm]	[ºC]	[g/cm³]	[%]
Cemento asfáltico Original						
A-13-165-55	10.25	42.5	48	54.90	1.06	-
B-15-155-50	11.50	20.0	52	54.70	1.03	-
Cemento asfáltico envejecido en RTFO						
A-13-165-55	13.75	72.5	39	70.25	0.97	0.87
B-15-155-50	18.25	22.5	33	64.00	1.04	0.58
Cemento asfáltico envejecido en PAV						
A-13-165-55	5.75	-	28	85.90	1.02	-
B-15-155-50	12.75	-	30	94.10	1.05	-

Con los porcentajes de caucho adicionados al ligante, la ductilidad decrece en más de un 90% respecto al cemento asfáltico sin modificar, reduciendo la penetración casi hasta la mitad, y aumentando el punto de ablandamiento. La pérdida de masa por envejecimiento en RTFO disminuye a la mitad respecto a la pérdida sufrida por el cemento asfáltico sin modificar. Uno de los mayores beneficios encontrados con la modificación del ligante es la recuperación elástica, la cual se mejora en grandes proporciones con la adición de GCR, incrementándose aún más después de que el ligante se somete al proceso de envejecimiento en el RTFO. El ligante de Apiay modificado con caucho aumenta más la elasticidad con menor cantidad de GCR que el de Barrancabermeja con mayores contenidos de GCR.

6.3.7 Determinación del grado PG. Las nuevas especificaciones para ligantes y ligantes modificados, desarrolladas por el Programa Estratégico de investigaciones en Caminos SHRP de los Estados Unidos ha desarrollado un sistema de clasificación y selección del cemento asfáltico en función de las condiciones climáticas del lugar donde este será

colocado. Estas condiciones son expresadas en rangos de temperaturas de diseño del pavimento permiten calcular las propiedades de flujo y deformación de los ligantes para unas condiciones de carga y temperatura adecuadas al proyecto en cuestión.

Las nuevas especificaciones SHRP contenidas en el Superpave, sigla en inglés que significa Superior Performing Asphalt Pavements, corresponden a un sistema integrado de selección de materiales, ensayos de desempeño y diseño de mezclas asfálticas, y predicción del desempeño del pavimento. Dichas especificaciones relacionan las propiedades físicas de los asfaltos con principios ingenieriles, relacionando características reológicas del ligante con su comportamiento en el pavimento, propiedad de suma trascendencia a fin de prever la durabilidad del cemento asfáltico.

En las especificaciones SHRP, el valor del parámetro es siempre constante y medido a distintas temperaturas, logrando que se establezca un valor crítico constante de la propiedad a analizar, variando la temperatura del ensayo para la cual el valor es alcanzado. Los ensayos que se realizan en cumplimiento con las nuevas especificaciones SHRP se basan en mediciones de las propiedades fundamentales del cemento asfáltico que relacionan tensiones y deformaciones en el material. El módulo complejo y la rigidez del ligante son medidos, mas no estimados, a las temperaturas de ensayo; asimismo la deformación a baja temperatura y la viscosidad rotacional a alta temperatura son parte del conjunto de ensayos utilizados.

Con la información de viscosidad rotacional, módulo complejo, ángulo de fase, rigidez y valor-m medidos a temperaturas criticas de servicio, se tiene una visión de las características del ligante permitiendo confiar en ensayos realizados bajo condiciones que simulan tres etapas criticas por las que pasa el ligante en el pavimento, como son la deformación permanente, la fatiga y el fisuramiento térmico. Las temperaturas de diseño del sistema de clasificación de ligantes Superpave han sido elegidas en función de estos tres mecanismos de falla. Para altas temperaturas se toma la mayor temperatura del aire registrada durante 7 días seguidos, la que mediante un algoritmo se traduce en temperatura del pavimento a una profundidad de 20 mm desde la superficie. En el caso de las bajas

temperaturas se considera como critica la menor temperatura alcanzada durante el año. En relación al fenómeno de fatiga se calculan los parámetros a temperaturas intermedias.

El grado de desempeño de los ligantes contenido en la especificación Superpave indican las temperaturas superiores e inferiores que los mismos resisten adecuadamente, con el fin de maximizar la resistencia a la deformación permanente, fisuras por fatiga y fisuramiento térmico.

Finalmente, la selección del grado de ligante asfáltico en el sistema de clasificación Superpave se realiza de tres maneras: por área geográfica a través del uso de mapas de temperatura especialmente diseñados, por temperatura del aire que luego se convierte en temperatura del pavimento, o bien por temperatura del pavimento de diseño determinadas por el ingeniero de vías. Existe también una corrección contemplada por el tipo de tráfico con lo cual el ligante es seleccionado según el clima y el tránsito de la región.

Cuadro 6.77. Grado de desempeño de los cementos asfálticos estudiados.

Cemento asfáltico	**Apiay**	**A-13-165-55**	**Barranca**	**B-15-155-50**
Grado de desempeño PG	PG 58-22	PG-88-16	PG 58-16	PG 76-22
Cemento asfáltico original				
Viscosidad Brookfield	Máximo 3 Pa.s			
Viscosidad @ 135°C, Pa.s	0.30	5.30	0.27	3.00
Clasificación SUPERPAVE	Pasa	No pasa	Pasa	Pasa
DSR, 10 rad/s	Mínimo 1.00 kPa			
G*/senoδ , Temperatura [°C]	58	88	58	76
Residuo del RTFO				
DSR, 10 rad/s	Mínimo 2.20 kPa			
G*/senoδ , Temperatura [°C]	64	88	64	76
Grado alto SUPERPAVE	58	88	58	76
Residuo del PAV				
DSR, 10 rad/s	Máximo 5000 kPa			
G*senoδ , Temperatura [°C]	22	19	25	19
Clasificación SUPERPAVE	-22	-58	-16	-46
BBR	S máximo 300 MPa, valor m mínimo 0.300			
S(t), m(t), Temperatura [°C]	-12	-6	-12	-12
Clasificación SUPERPAVE	-22	-16	-22	-22
Grado bajo SUPERPAVE	-22	-16	-16	-22

6.3.8 Ligante modificado con GCR escogido. Para la elaboración de las mezclas asfálticas se escogió entre los dos ligantes con caucho estudiados el ligante B-15-155-50 por haber presentado un valor de viscosidad más bajo, cumpliendo con todas las especificaciones para la clasificación SUPERPAVE.

6.3.8.1 Análisis de segregación en la mezcla asfalto-caucho mediante la prueba de zenke. Este ensayo se realiza para verificar la estabilidad al almacenamiento que puede ocurrir entre el cemento asfáltico y el modificador. Consiste en verter 50 g de cemento asfáltico modificado dentro de un tubo de aluminio y someterlo a una temperatura de 160°C durante 48 horas en posición vertical; transcurrido este tiempo el ligante se deja enfriar, posteriormente se corta el tubo en tres secciones iguales, desechando el tercio medio y sometiendo a ensayos el ligante ubicado en el tope y en la base para determinar si hubo o no separación del modificador.

El ensayo realizado al ligante fue el del DSR para estado original; con este ensayo se determinó la variación en el módulo complejo y el ángulo de fase entre el ligante que se ubicó en el tope del tubo y el que se ubicó en el fondo.

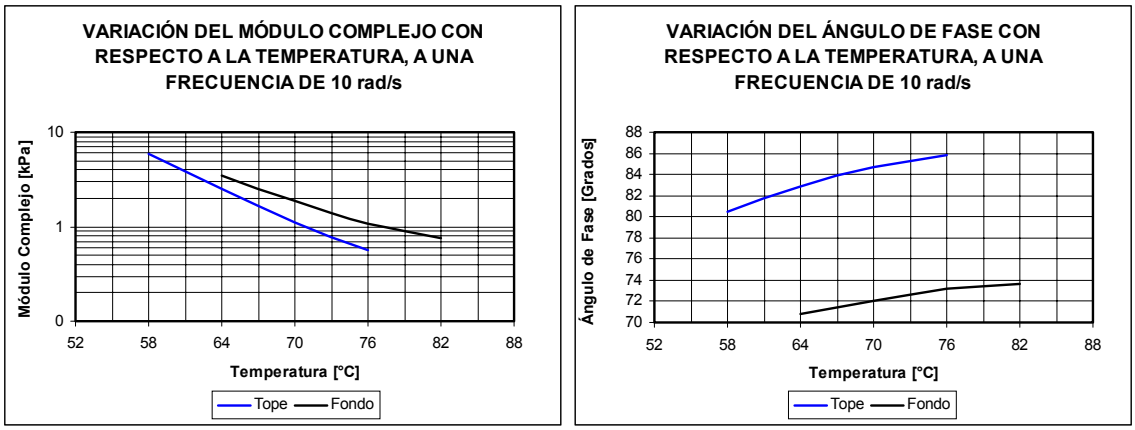


Figura 6.69 Gráficos que muestran la segregación del ligante B-15-155-50 en estado original, mediante el análisis del módulo complejo y el ángulo de fase del ligante modificado sometido a la prueba de Zenke.

Se puede apreciar en los gráficos anteriores que en el fondo el módulo complejo es mayor y el ángulo de fase menor, comparado con el del tope; esto indica que el fondo es más rígido con una componente elástica mayor. Por lo tanto se puede concluir que el ligante B-15-155-50 experimentó sedimentación del modificador, donde el GCR se concentró en su mayoría en el fondo y el cemento asfáltico en el tope, condición que no es deseable puesto que va a presentar inconvenientes en el almacenamiento de la mezcla asfalto-caucho.

6.3.9 Ensayos realizados a las mezclas asfálticas elaboradas con ligante modificado con GCR. Después de haber obtenido el adecuado ligante modificado con GCR se procedió a buscar el contenido óptimo de este mediante la elaboración de cuatro probetas con diferentes contenidos de asfalto-caucho, evaluando los módulos dinámicos y el contenido de vacíos con aire. Determinado el contenido óptimo de ligante modificado con GCR se procedió a evaluar las mezclas asfálticas mediante ensayos de fatiga y deformación permanente. Estos ensayos se relacionan a continuación:

- Compactación en la máquina de cizallamiento giratorio PCG, para determinar, mediante la evaluación de módulos dinámicos y porcentaje de vacíos con aire, la proporción óptima de cemento asfáltico.
- Determinación del Módulo Dinámico a 5, 25 y 40 ºC, y frecuencias de carga de 1, 4, 10 y 16 Hz.
- Determinación del contenido de vacíos con aire en la mezcla asfáltica.
- Determinación del comportamiento a la fatiga.
- Determinación de la resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo de laboratorio.

6.3.9.1 Contenido de vacíos con aire. Como se mencionó anteriormente, el criterio de selección de la cantidad óptima de ligante modificado con GCR es el contenido de vacíos

con aire, el cual según CALTRANS se encontrará entre 3% y 4% para clima caliente, y 3% en clima de montaña. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Cuadro 6.78. Resultados porcentaje de vacíos en la mezcla total para diferentes contenidos de asfalto-caucho en el diseño por el proceso húmedo.

% de asfalto	5.5 %	6.0 %	6.5 %	7.0 %
Código	% Vacíos con aire en la mezcla total			
Proceso húmedo	16.94	16.24	9.95	0.27

6.3.9.2 Módulos Dinámicos. La evaluación del Módulo Dinámico en las mezclas asfálticas utilizando este proceso sirvió como complemento para determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico modificado con GCR, junto al análisis en el contenido de vacíos con aire. Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma INV E-754.

Cuadro 6.79. Resultados Módulos Dinámicos para diferentes contenidos de asfalto-caucho en el diseño por el proceso húmedo.

Temperatura de Ensayo	Frecuencia	Módulo Dinámico [kg/cm²]			
[ºC]	[Hz]	5.5 %	6.0 %	6.5 %	7.0%
5	1	36149	62135	82107	35963
	4	41885	70857	92342	45784
	10	47091	77637	96926	52325
	16	49891	82234	100908	56120
25	1	6930	13845	14447	9725
	4	9706	19788	22220	14591
	10	11987	24407	28233	17779
	16	13109	26599	31054	19637
40	1	3405	6613	8701	3345
	4	4273	8709	11162	3867
	10	5079	10469	13310	4711
	16	5669	11471	14698	5308

Se evaluaron cuatro contenidos de ligante modificado con caucho para la elaboración de cuatro probetas utilizando la granulometría discontinua, estos fueron de 5.5, 6.0, 6.5% y 7.0%. Se analizó la variación del Módulo Dinámico con relación al incremento del porcentaje asfalto-caucho, así como la variación relacionada con los incrementos de temperatura a diferentes frecuencias y con el incremento de la frecuencia de carga a diferentes temperaturas.

El módulo dinámico aumenta a medida que se incrementa el contenido de asfalto-caucho hasta un óptimo de 6.5% y luego empieza a decrecer, donde para un contenido de 7.0% de asfalto caucho el módulo llega a ser solo un poco mayor al contenido de 5.5%.

Como era de esperarse se observa que para una misma frecuencia de aplicación de carga los módulos aumentan con la disminución de la temperatura, con un incremento aproximado al 150% entre 40°C y 25°C, y aproximadamente 300% entre 25°C y 5°C, siendo de 800% entre 40°C y 5°C.

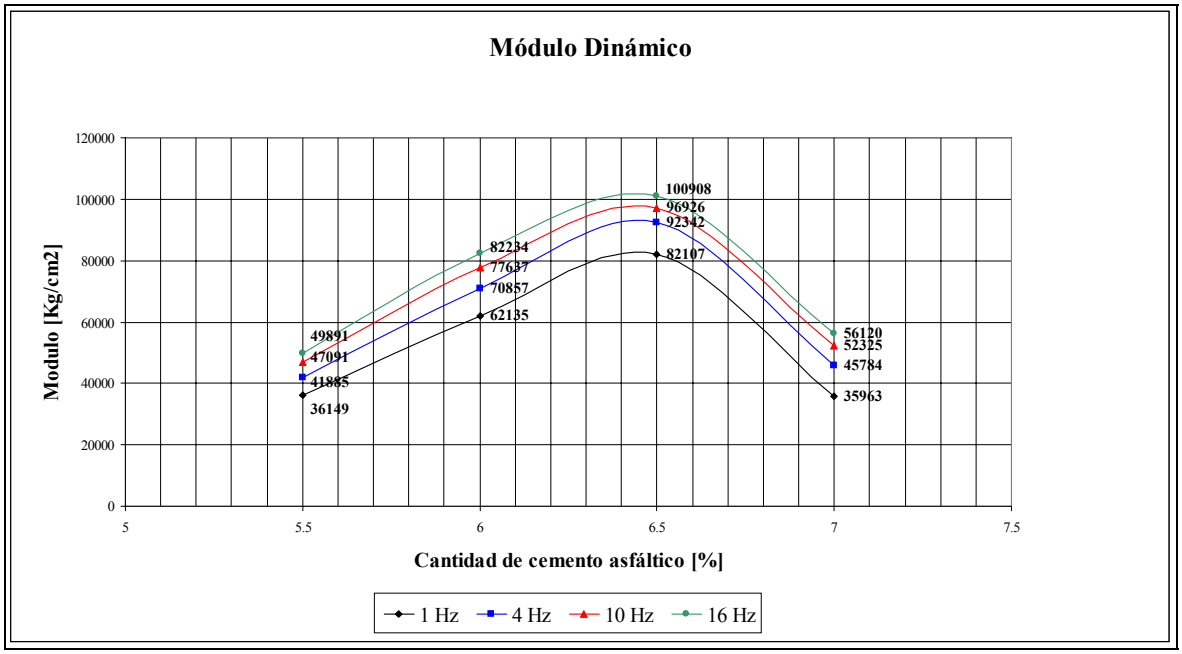


Figura 6.70. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 5°C, en los diseños McDonald.

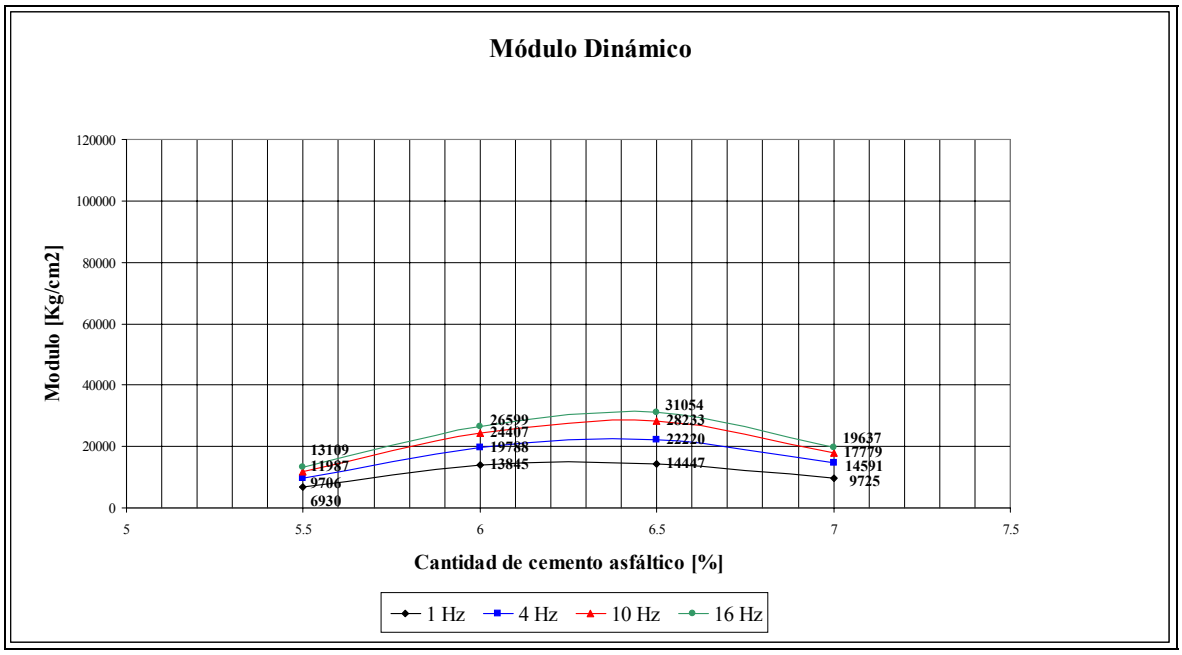


Figura 6.71. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 25°C, en los diseños McDonald.

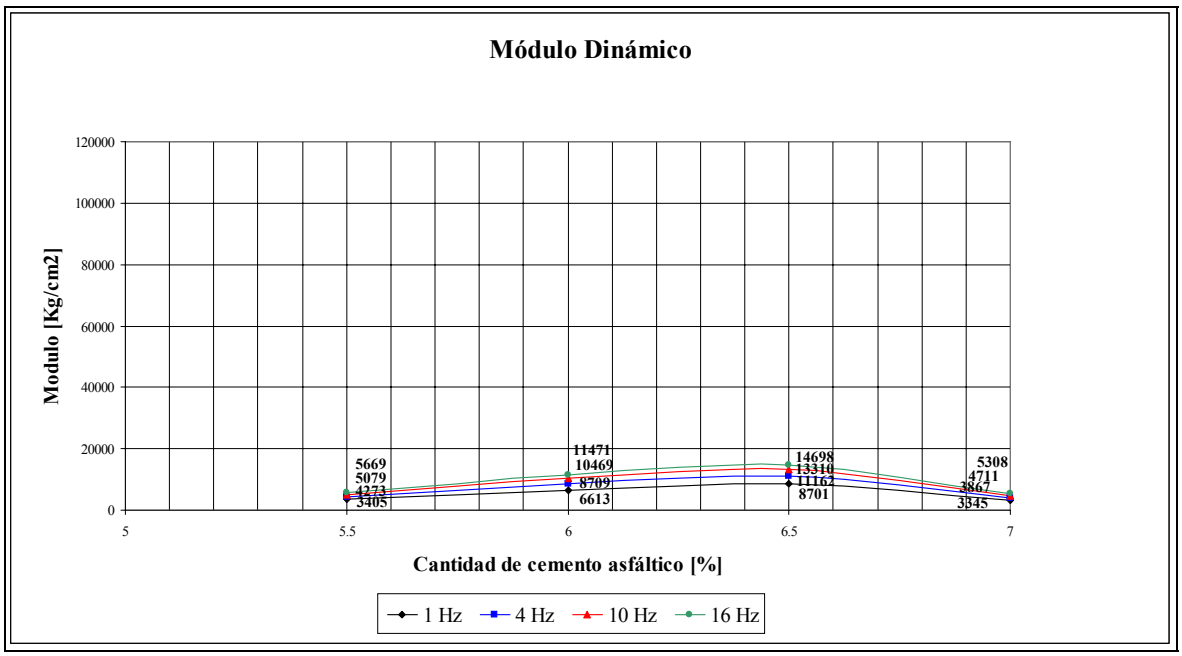


Figura 6.72. Variación del Módulo Dinámico con relación al incremento en el contenido de ligante modificado con GCR, para una temperatura de 40°C, en los diseños McDonald.

A continuación se presentan los gráficos que relacionan el Módulo Dinámico y la frecuencia de aplicación de carga para cada una de las tres temperaturas, para observar la susceptibilidad térmica del conjunto.

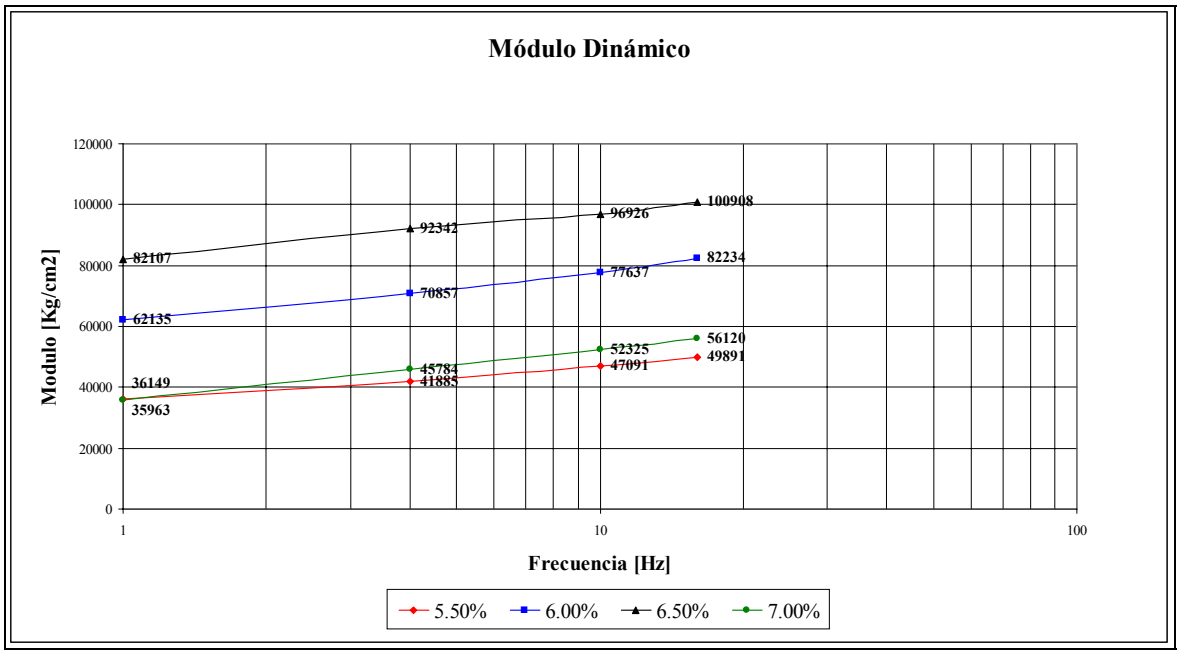


Figura 6.73. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 5°C, para los diseños McDonald.

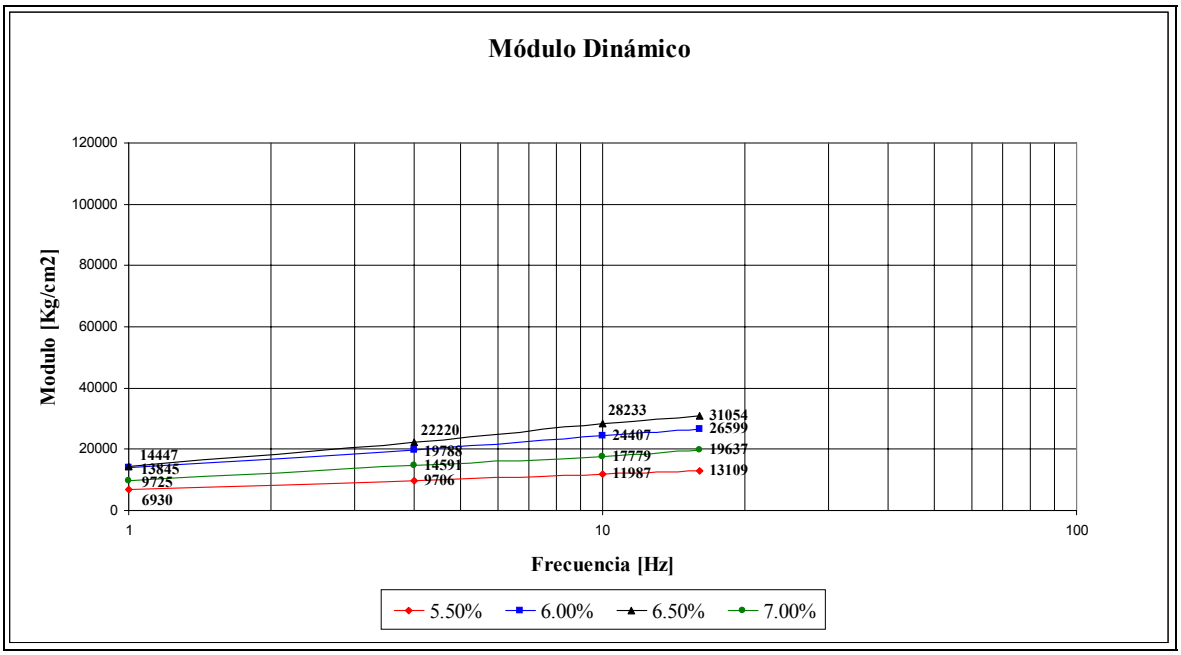


Figura 6.74. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 25°C, para los diseños McDonald.

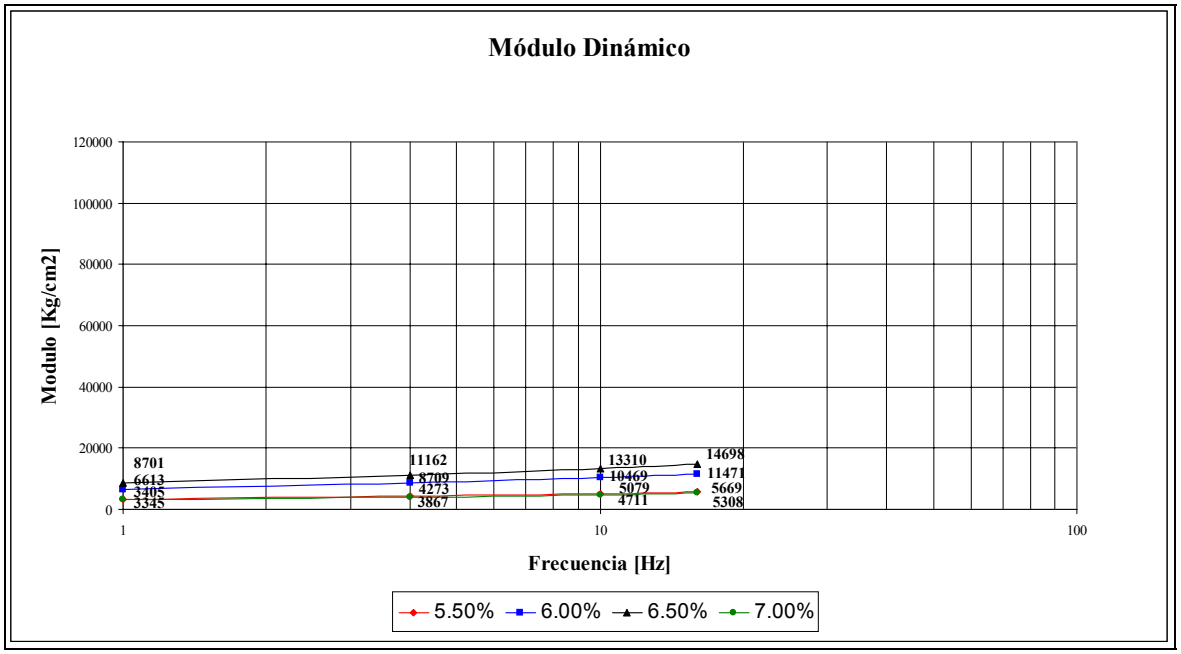


Figura 6.75. Variación del Módulo Dinámico con relación a la frecuencia de aplicación de carga a una temperatura de 40°C, para los diseños McDonald.

A continuación se presentan los gráficos que relacionan el Módulo Dinámico y la temperatura para cada una de las cuatro frecuencias.

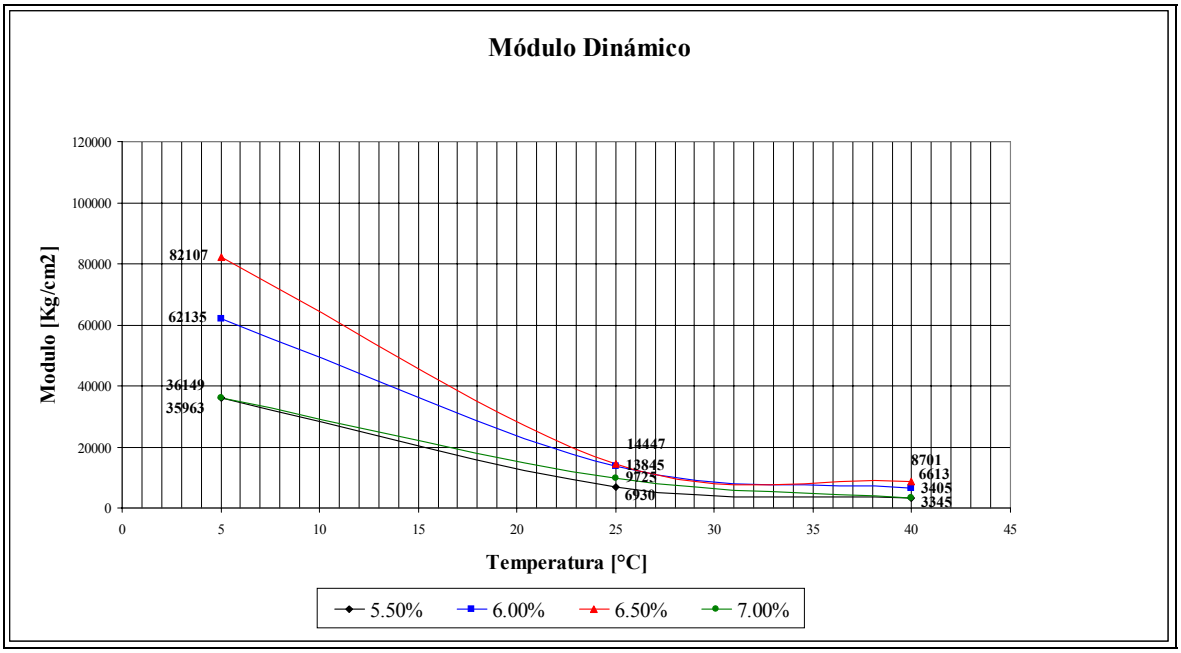


Figura 6.76. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 1 Hz, para los diseños McDonald.

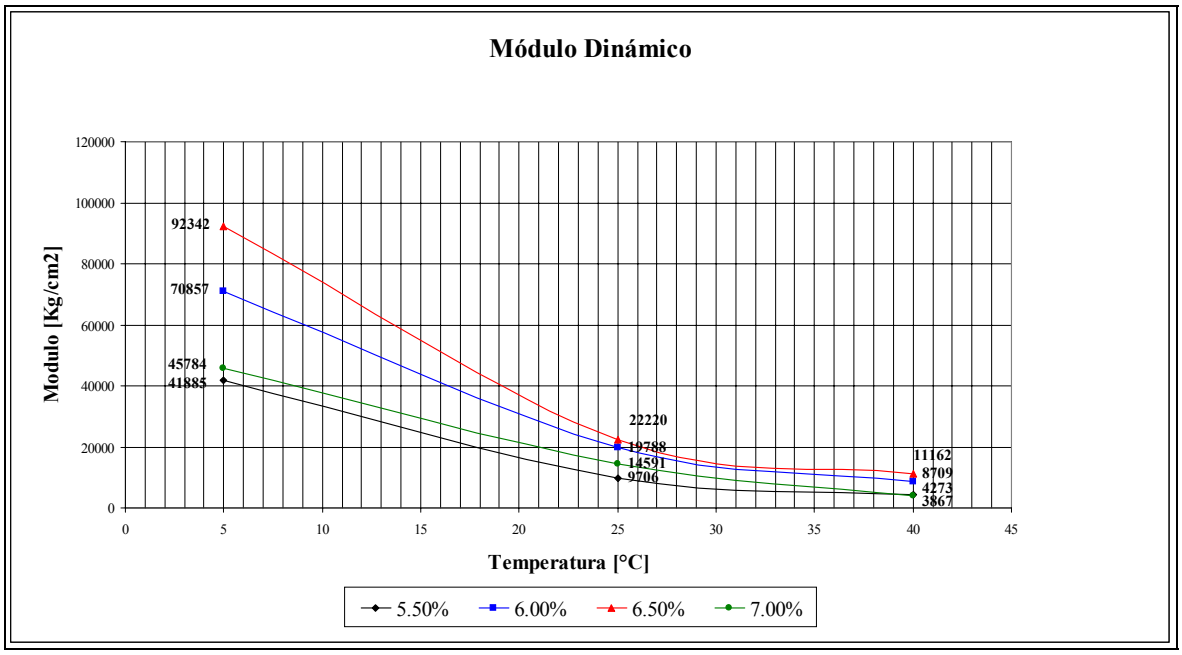


Figura 6.77. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 4 Hz, para los diseños McDonald.

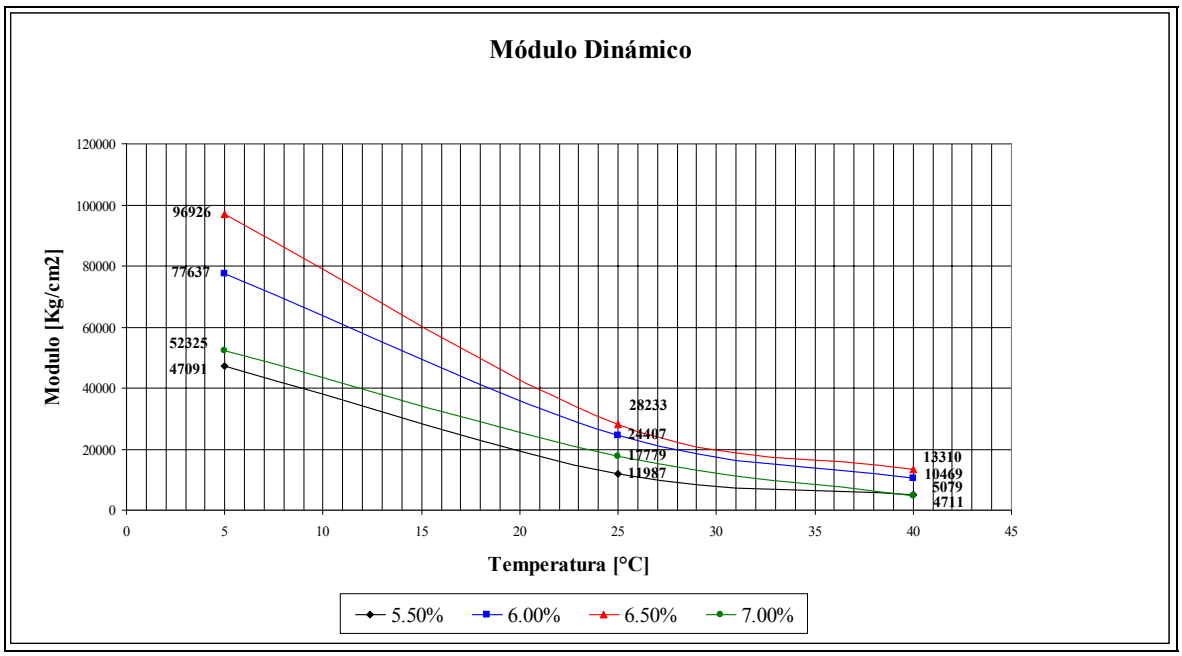


Figura 6.78. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz, para los diseños McDonald.

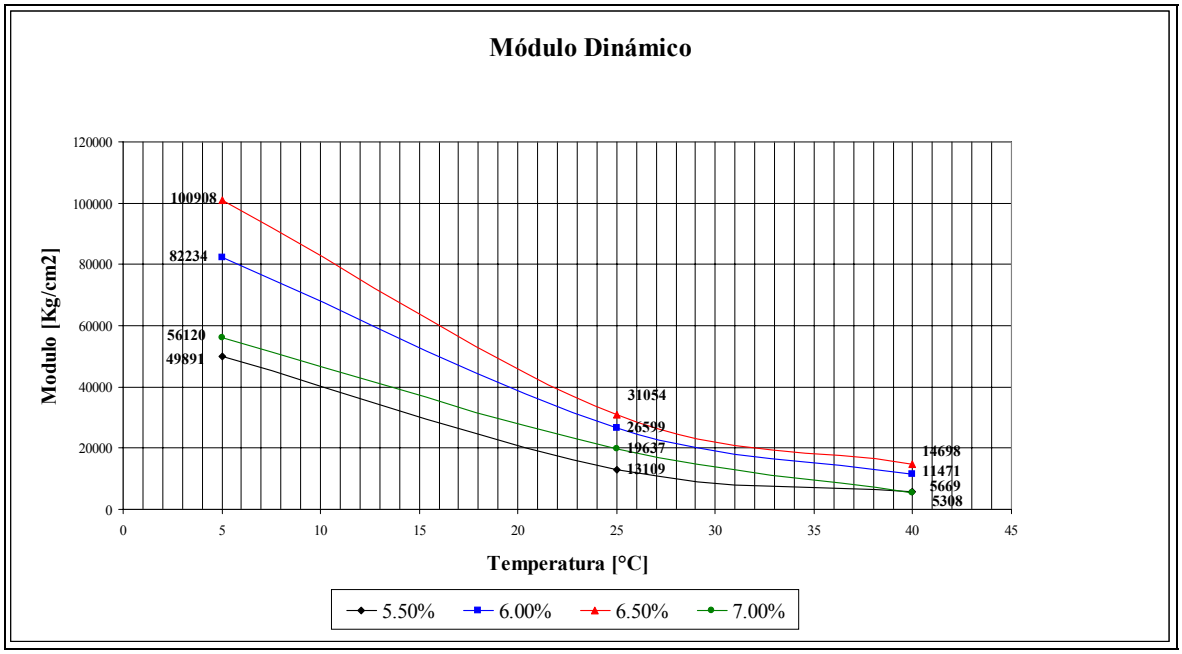


Figura 6.79. Variación del Módulo Dinámico con relación a la temperatura, a una frecuencia de aplicación de carga de 16 Hz, para los diseños McDonald.

6.3.9.3 Diseño óptimo de la mezcla asfáltica con asfalto-caucho. De acuerdo a los módulos dinámicos y el contenido de vacíos con aire de las probetas elaboradas con diferentes porcentajes de cemento asfáltico modificado con GCR, se encuentra que la cantidad óptima de ligante a ser utilizada con esta granulometría discontinua es de 6.9%; el criterio utilizado en la escogencia del óptimo fue que el contenido de vacíos en la mezcla total, el cual según CALTRANS debe ser de 3.0%.

El módulo Dinámico para este contenido de asfalto-caucho a una temperatura de 25°C y una frecuencia de 10 Hz es de 20.500 kg/cm². El peso unitario fue de 1.91 g/cm³ y el específico máximo 1.98.

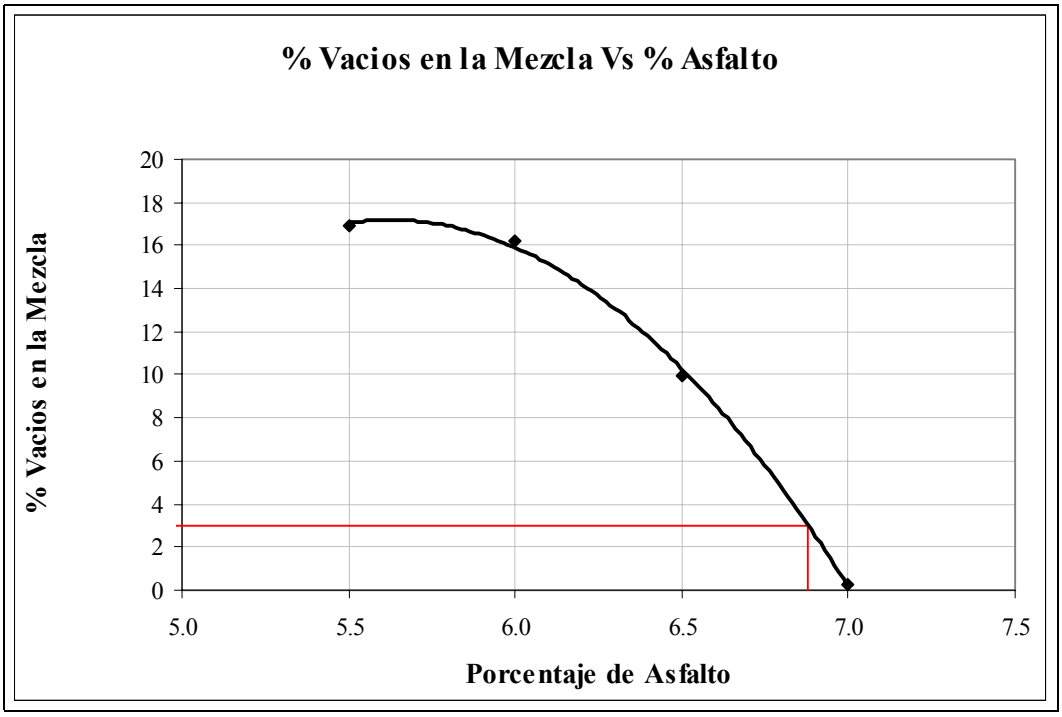


Figura 6.80. Variación del porcentaje de Vacíos con aire en la mezcla total respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald.

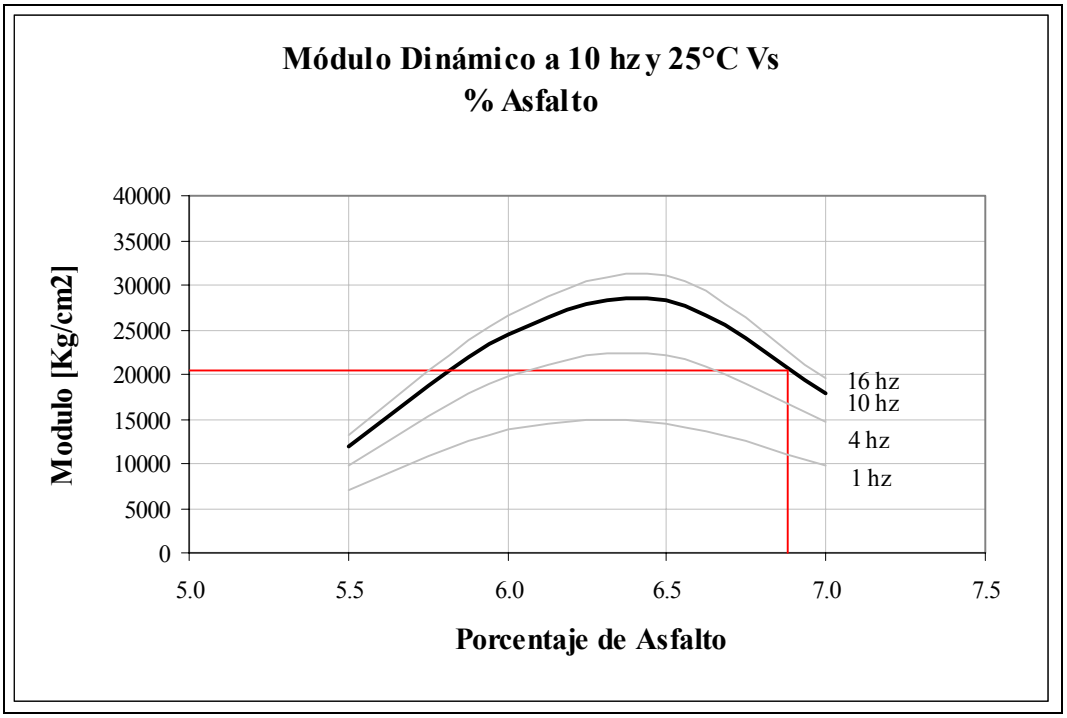


Figura 6.81. Variación del Módulo Dinámico a 25°C respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald.

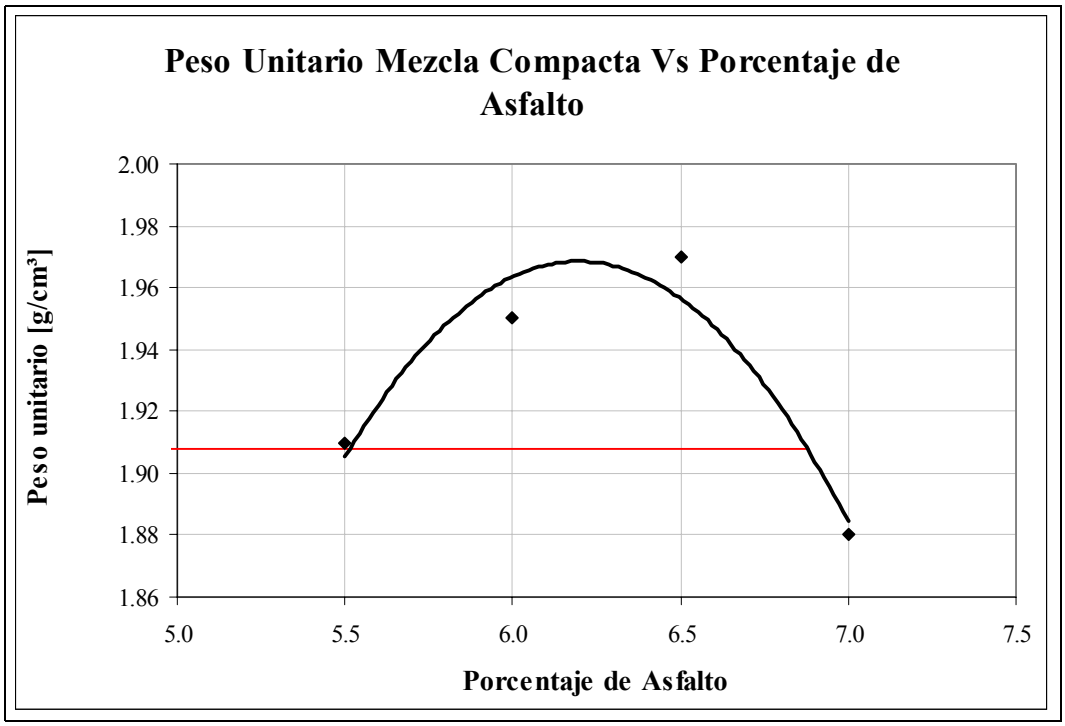


Figura 6.82. Variación del Peso unitario respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald.

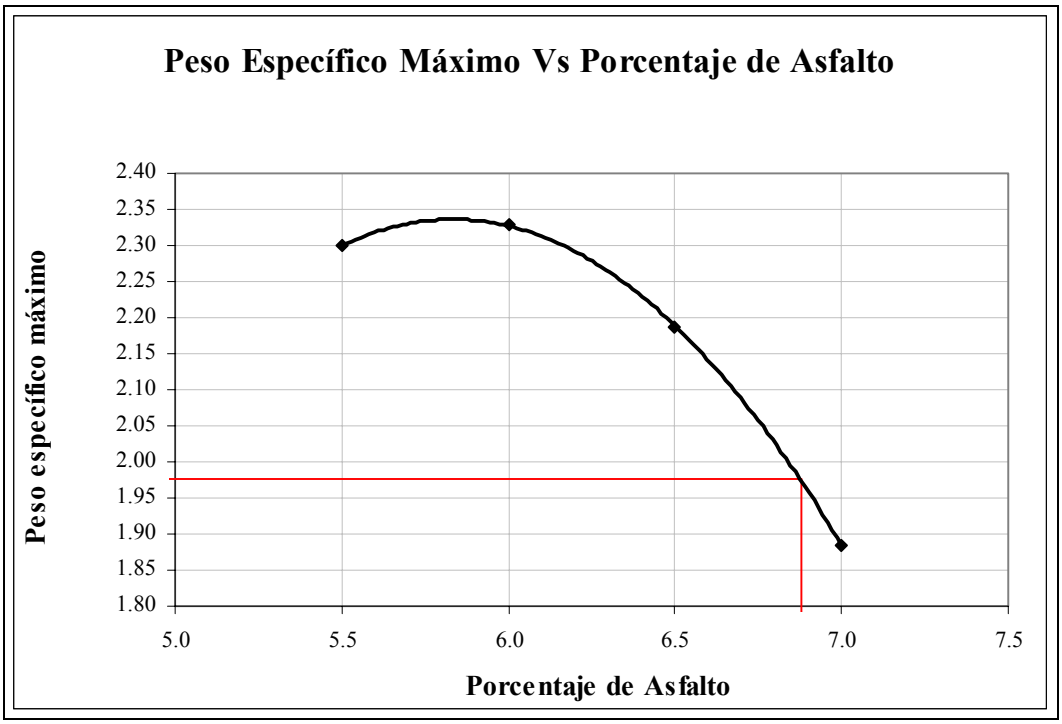


Figura 6.83. Variación del Peso específico máximo respecto al porcentaje de asfalto-caucho para el diseño McDonald.

6.3.9.4 Deformación permanente. Para comparar la deformación permanente en la mezcla asfáltica preparada con el ligante B-15-155-50, se elaboró una mezcla asfáltica empleando la misma granulometría, con cemento asfáltico de Barrancabermeja sin modificar. Este ensayo se realizó de acuerdo con la norma española NLT 173/84.

Cuadro 6.80. Resultados Deformación permanente en el diseño McDonald.

Intervalo [min]	Velocidad de deformación [μm/min]		Deformación acumulada [mm]	
Diseño	Barranca	McDonald	Barranca	McDonald
30-45	63.33	40.00	4.20	6.60
75-90	46.67	36.67	7.10	8.20
105-120	36.67	63.33	8.70	10.20

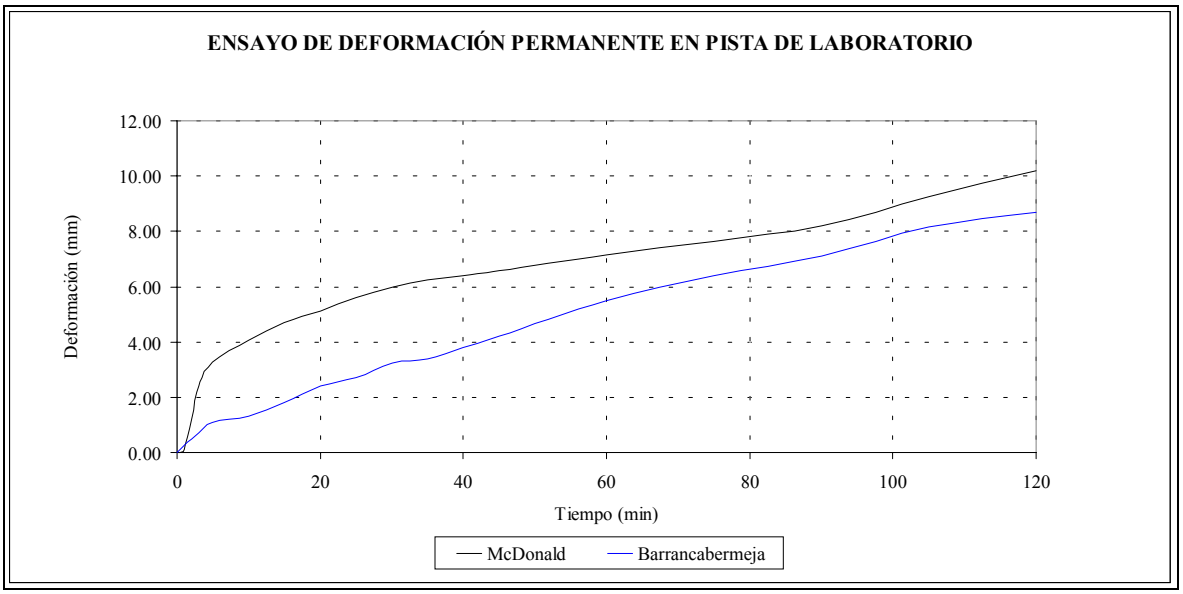


Figura 6.84. Progreso de la deformación permanente, en los diseños McDonald y Barrancabermeja.

La deformación plástica con este huso granulométrico, tipo discontinuo, y con el ligante modificado con GCR es demasiado alta para las especificaciones españolas, donde consideran una velocidad de deformación máxima de 20 μm/min en el intervalo 105 a 120 minutos.

La alta deformación plástica obtenida se debe en gran parte al huso granulométrico estudiado, y en una menor proporción al ligante modificado con GCR. Como se vio en los análisis reológicos del ligante, Barrancabermeja y B-15-155-50 después del RTFO obtienen rigideces muy parecidas, sin embargo B-15-155-50 llega a ser un poco más elástico que Barrancabermeja, situación que no logra hacerlo muy competente al compararlo con el no modificado.

Otra razón muy importante para lograr este resultado es el alto contenido de ligante que requirió la mezcla asfáltica para obtener el contenido de vacíos especificado por CALTRANS.

Fotografía 6.44. Ensayo de Ahuellamiento en una probeta McDonald con 7% de ligante B-15-155-50.

6.3.9.5 Resistencia a la fatiga. Este ensayo se realizó siguiendo la norma francesa NFP-98-260.

Cuadro 6.81. Resultados Ley de Fatiga de Mezclas asfálticas, diseños McDonald.

Probeta No.	McDonald	
	N	ε_t
1	11893800	100E-6
	6242400	153E-6
	2824800	220E-6
2	11177400	100E-6
	5929200	153E-6
	2949000	220E-6
3	18442200	87E-6
	6832200	153E-6
	3399600	220E-6
4	18918000	87E-6
	8100000	153E-6
	3397200	220E-6
ε_6	407E-6	
b	-0.5342	
α	1.87	

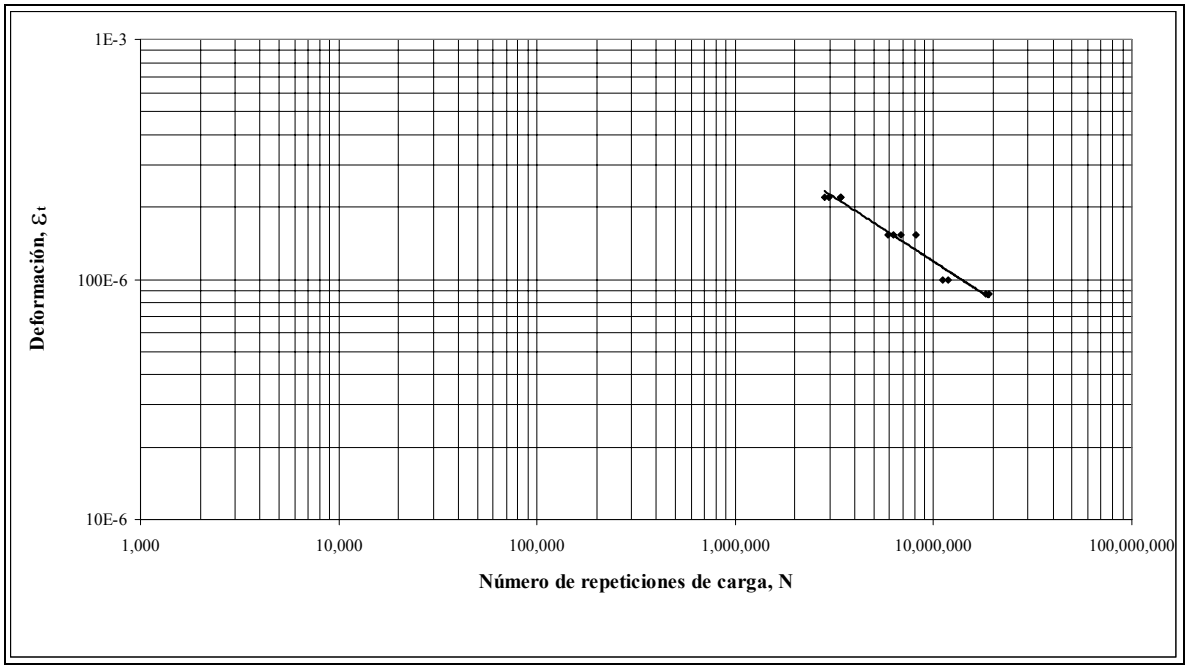


Figura 6.85. Curva de Fatiga de los diseños McDonald.

De los anteriores resultados se puede observar que al modificar el ligante con GCR el comportamiento a la fatiga es muy bueno, mucho mejor que los resultados obtenidos en el proceso seco. La deformación de referencia ε_6 mejora casi en un 100%, sin embargo la pendiente b se incrementa.

7 EJECUCIÓN DEL TRAMO DE PRUEBA EN EL CARRUSEL DE FATIGA

Con el objeto de conocer las leyes de degradación de los pavimentos elaborados con mezcla asfáltica mejorada con caucho, es necesario estudiar su comportamiento a escala real, utilizando las mismas técnicas de fabricación, colocación y compactación utilizadas en una obra de pavimentación normal. Así mismo debe realizarse un adecuado seguimiento y auscultación que permita la correcta evaluación del estado del pavimento, como lo son las mediciones de fisuración, de perfiles transversales, y deflexiones estáticas.

Para realizar este estudio se recurrió a la utilización del Carrusel de Fatiga, el cual es una forma de ensayo acelerado, ALT (Accelerated Loading Test), en el que se aplica una carga artificial que produce en un menor tiempo los mismos efectos ocasionados por el paso de tráfico normal. La realización de este ensayo permitirá obtener a corto plazo resultados claros sobre el comportamiento a una escala práctica real de los pavimentos con mezclas asfálticas mejoradas con caucho.

7.1 CARRUSEL DE FATIGA

Un carrusel de fatiga es un equipo cuyo funcionamiento se basa en hacer girar un eje con carga específica sobre una pista circular especialmente construida para tal fin. Su principal característica es la de poder someter en forma acelerada al pavimento en estudio a las degradaciones y fatiga que ocurren en la práctica durante varios años en las vías. El Carrusel de Fatiga de la Universidad de Los Andes está ubicado en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería CITEC, en la zona industrial de Puente Aranda de la ciudad de Bogotá D.C..

Fotografía 7.1. Carrusel de Fatiga de la Universidad de Los Andes.

El Carrusel de Fatiga cuenta con una pista circular de cuatro metros de ancho y una longitud que puede variar aproximadamente entre 24.6 m y 30.6 m dependiendo de la posición de los troques. La frecuencia de aplicación de carga dependerá también de la posición del troque y la carga aplicada, la cual puede llegar a ser en promedio de 28 repeticiones por minuto. La aplicación de carga puede variarse hasta quince toneladas por eje.

Con el fin de realizar estudios comparativos, es posible construir una pista conformada por diferentes tramos de prueba, los cuales pueden tener estructuras de pavimento diferentes, y de esta forma realizar análisis comparativos bajo las mismas condiciones de tráfico, clima y nivel freático.

Las cargas del Carrusel simulan el paso de ejes simples que pueden alcanzar hasta 15 toneladas. El paso de las ruedas puede ser variado en una amplitud de un metro para

simular el paso de cargas parecido al que se presenta en una vía real, y así evitar el ahuellamiento que se pueda generar por la repetición de cargas en un mismo punto.

7.2 TRAMOS DE PRUEBA Y ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Se construyeron dos tramos de prueba de igual estructura con el fin de comparar el comportamiento de una mezcla asfáltica convencional y una mejorada con caucho. De acuerdo con la evaluación dinámica en laboratorio efectuada a las cuatro mezclas asfálticas mejoradas con caucho, y elaboradas mediante el proceso seco, se escogió como mejor diseño la mezcla MDC-2 con 1% de caucho.

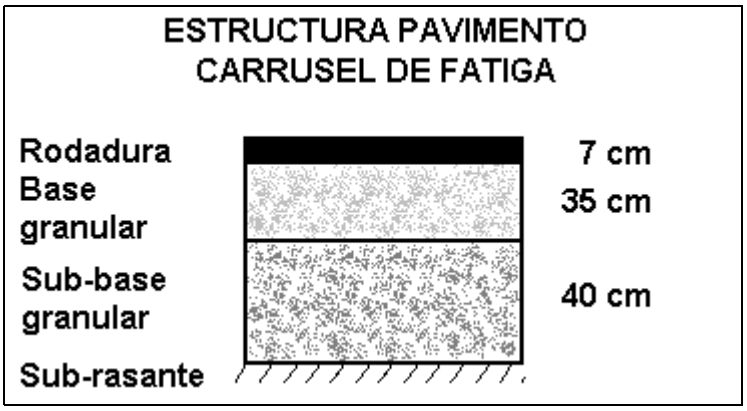


Figura 7.1. Esquema de la estructura del pavimento colocado en el Carrusel de Fatiga.

Con el fin de poder comparar la mezcla asfáltica mejorada con caucho fue necesario realizar el mismo tipo de mezcla asfáltica sin caucho. Para esto se dividió el Carrusel de Fatiga en dos áreas iguales así, el sector que se encuentra hacia el norte se construyó con una MDC-2, y el ubicado hacia el sur con la MDC-2 mejorada con 1% de caucho. Para el cálculo de los módulos elásticos de cada material se realizaron ensayos de módulos dinámicos a las dos mezclas asfálticas procedente de la planta de mezclado, y módulos resilientes a los materiales granulares. Estos fueron los resultados:

Cuadro 7.1. Módulos elásticos de las diferentes capas que conforman la estructura del pavimento colocado en el Carrusel de Fatiga.

Diseño	**MDC-2 0%**	**MDC-2 1%**
Capa	Módulo [kg/cm²]	
Rodadura [25°C, 10 Hz]	40500	29373
Base granular (B-600)	2340	
Sub-base granular (B-600)		
Sub-rasante	150	

Colocación y compactación de materiales granulares. Sobre la subrasante se colocó una estructura de 75 cm de material granular B-600, conformada en capas de 20 cm, a las que se les controló la densidad de compactación con ensayos de cono y densímetro nuclear, la humedad y densidad se obtuvieron del ensayo Proctor modificado. En el ANEXO C se presenta un completo registro fotográfico del Carrusel de Fatiga desde la construcción hasta la falla.

Fotografía 7.2. Colocación y compactación material granular.

Al material granular se le realizó ensayos de caracterización como límites de Atterberg, equivalente de arena, determinación de finos por medio de azul de metileno, análisis granulométrico, desgaste en máquina de los ángeles, y módulo resiliente.

La subrasante, el suelo natural ubicado bajo las instalaciones del carrusel de fatiga, es un suelo que presenta características de alta plasticidad, con un índice plástico de 36%, un límite líquido de 70.5%, y un porcentaje de pasa tamiz número 200 mayor a 90%. Este suelo se clasifica como limoso MH, cuyo módulo resiliente es de 150 kg/cm².

Fotografía 7.3. Control de compactación del material granular mediante densímetro nuclear.

7.2.1 Fabricación, colocación y compactación de la mezcla asfáltica. Las dos tipos de mezclas asfálticas, con y sin caucho, fueron fabricadas en la planta de la firma Patria S.A..

En la elaboración de la mezcla asfáltica no se presentó ningún inconveniente en adicionar el grano de caucho reciclado GCR a los agregados para la fabricación de la misma, donde inicialmente se realizó una premezcla del GCR con los finos de trituración, los cuales se introdujeron al tambor de mezclado por la entrada del RAP (Recycled Asphalt Pavement) para evitar que el GCR estuviera en contacto con la llama del quemador.

El premezclado del GCR y los finos de trituración se realizó cuidadosamente con el fin de conservar la dosificación del caucho, las dosificaciones tanto del GCR como del agregado fino se realizaron por peso, tal cual como se realizó en laboratorio. La mezcla de estos dos se hizo a mano para garantizar la uniformidad del GCR dentro de la mezcla asfáltica. Después de la producción de cada mezcla asfáltica se tomaron muestras para controlar que la Estabilidad y Flujo Marshall, el contenido de vacíos y la granulometría de los agregados estuviera dentro de lo especificado por el INVIAS para este tipo de mezcla asfáltica.

Fotografía 7.4. Grano de Caucho Reciclado y finos de trituración.

Fotografía 7.5. Premezclado del GCR y los finos de trituración.

La colocación y extensión de las mezclas asfálticas fue necesario realizarla a mano por la dificultad de maniobrar un equipo para tal fin en el espacio tan reducido con el que se contaba, presentándose inconvenientes de segregación de la mezcla asfáltica en algunos sectores, y la disminución rápida de la temperatura de compactación de la misma; sin embargo las mezclas asfálticas pudieron ser compactadas por encima de 120°C.

La compactación se realizó con un compactador Dynapac CA15 de rodillo metálico, puesto que una mezcla asfáltica mejorada con caucho no se debe compactar con rodillos de goma, ya que el GCR puede quedarse adherido al rodillo. La mezcla asfáltica mejorada con caucho se compactó hasta que la temperatura en la misma descendió hasta aproximadamente 60°C, con el objeto de evitar que el GCR generara expansión de la misma.

Fotografía 7.6. Colocación de la mezcla asfáltica.

Fotografía 7.7. Compactación.

7.3 OPERACIÓN DEL CARRUSEL DE FATIGA

Con el fin de simular el paso real de las llantas de los vehículos en una vía, las cuales no pasan siempre por un mismo sitio, se decidió variar periódicamente el paso de las llantas del carrusel, haciendo que las llantas pasaran por cinco ejes diferentes separadas cada uno 10 cm. La configuración de los ejes y frecuencia por los cuales circuló el carrusel es la que se presenta a continuación:

Figura 7.2. Distribución de la frecuencia de circulación del Carrusel de Fatiga.

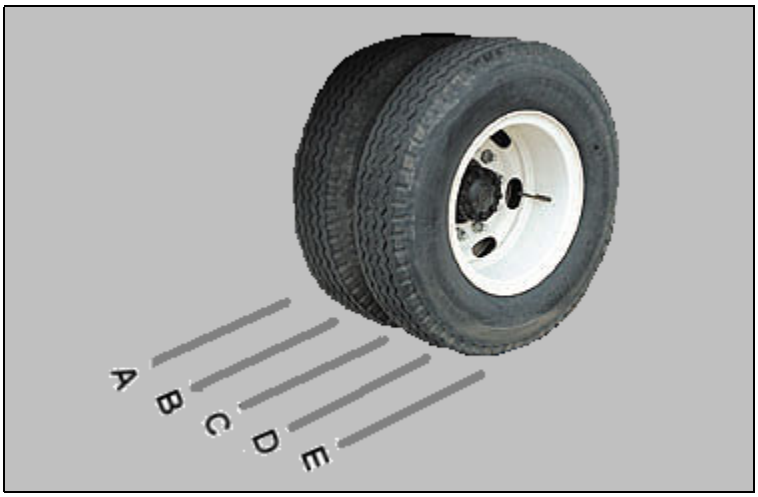


Figura 7.3. Esquema de los ejes por los cuales circula el Carrusel de Fatiga.

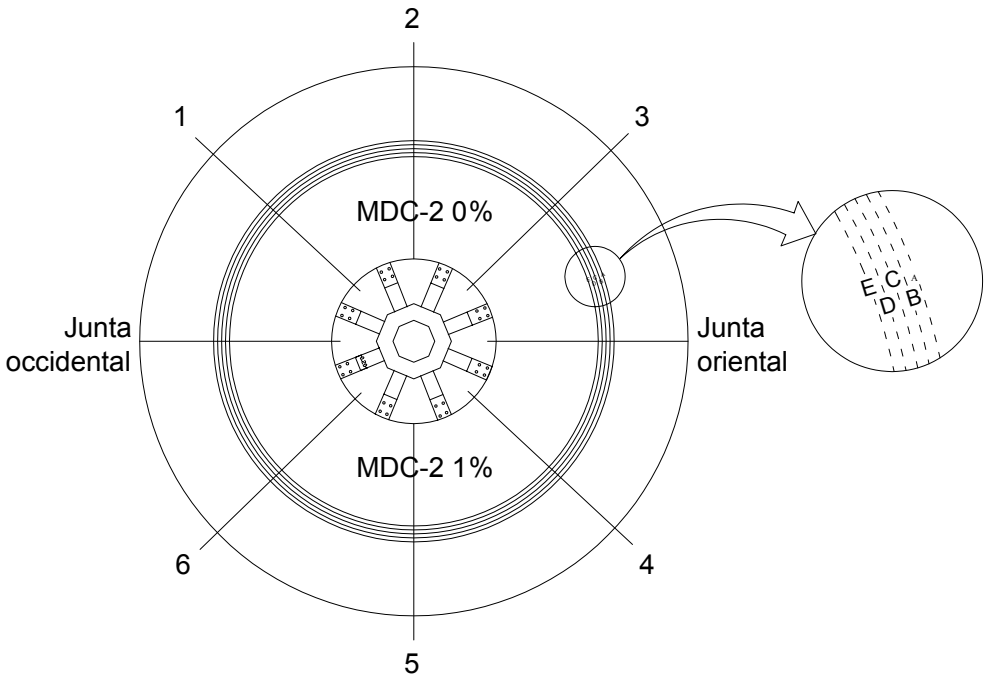


Figura 7.4. Esquema de los ejes por en el Carrusel de Fatiga.

7.4 SEGUIMIENTO Y AUSCULTACIÓN

En el seguimiento de la degradación del pavimento causado por las repeticiones de cargas a que fue sometido, periódicamente se registró la deformación permanente o ahuellamiento de la estructura, haciendo seguimiento cada hora de la temperatura del pavimento.

Así mismo se midieron día a día deflexiones estáticas con viga Benkelman, y se hacía control de la fisuración que iba apareciendo para finalmente tener un resultado de densidad de fisuración por metro cuadrado en la capa de rodadura.

Fotografía 7.8. Control de temperatura del pavimento.

Fotografía 7.9. Control de la deformación permanente.

Fotografía 7.10. Medición de deflexiones estáticas.

7.4.1 Deformación permanente. El control a la deformación permanente ó ahuellamiento de la estructura se hizo sobre los seis ejes (tres para la mezcla sin caucho, y tres para la mezcla con caucho) mediante el uso de una regla de aluminio debidamente nivelada, y colocada siempre en los mismo puntos de apoyo. Las mediciones se realizaron con un calibrador electrónico cada 5 cm.

Las deformaciones máximas en cada eje después de las 210.135 repeticiones de carga de 13 toneladas fueron:

Cuadro 7.2. Deformaciones máximas obtenidas en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga.

Tipo de Mezcla asfáltica	Eje	Deformación [mm]
MDC-2 sin caucho	1	13.4
	2	25.35
	3	49.28
MDC-2 Con 1% de caucho	4	9.51
	5	9.96
	6	5.85

Con los resultados de deformaciones máximas se puede observar que la estructura que mayor deformación permanente sufrió fue la que se conformó con la capa asfáltica fabricada sin caucho, aún siendo que esta capa tiene mayor módulo.

A continuación se presentan gráficos comparativos de las curvas de deformación, medidas para diferentes repeticiones de carga, con el fin de mostrar el avance de la deformación en la estructura con el incremento del número de ejes.

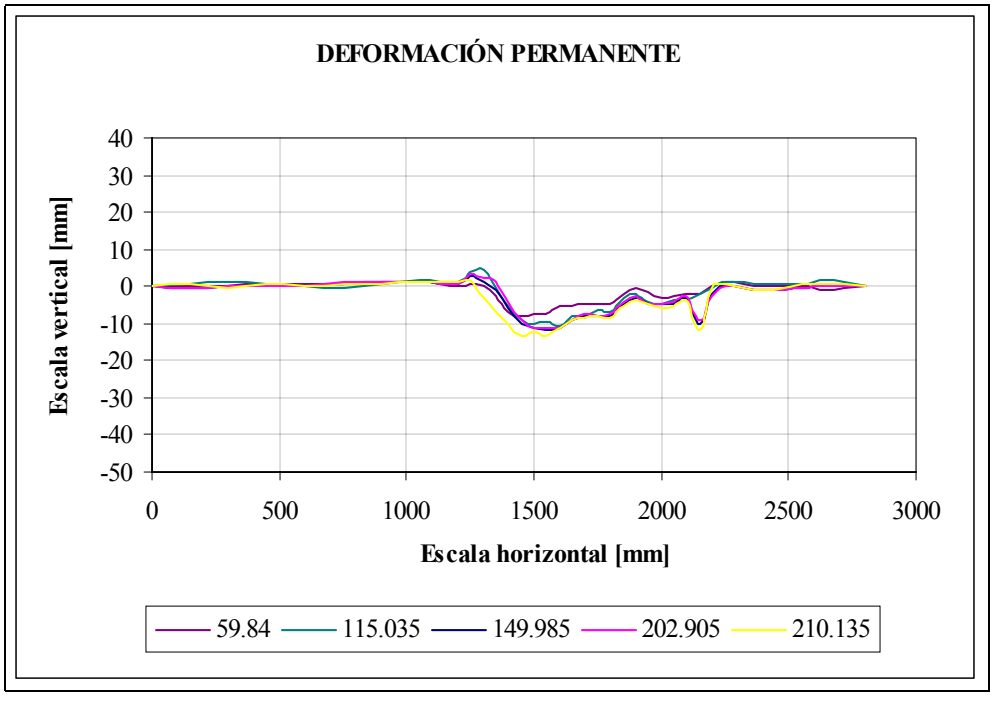


Figura 7.5. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 1, diseño MDC-2 sin caucho.

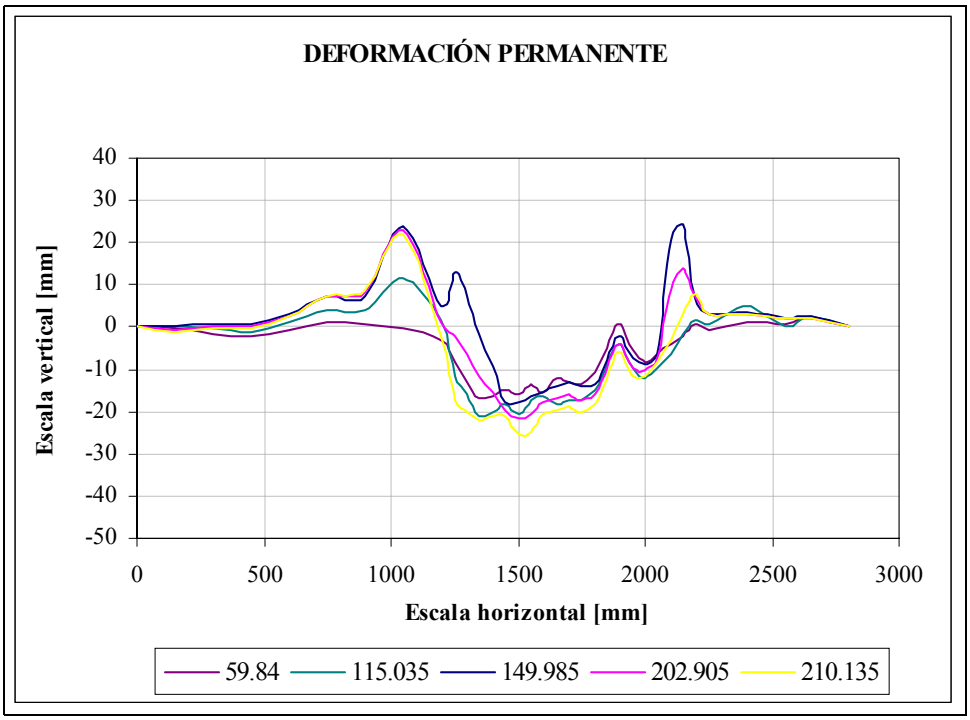


Figura 7.6. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 2, diseño MDC-2 sin caucho.

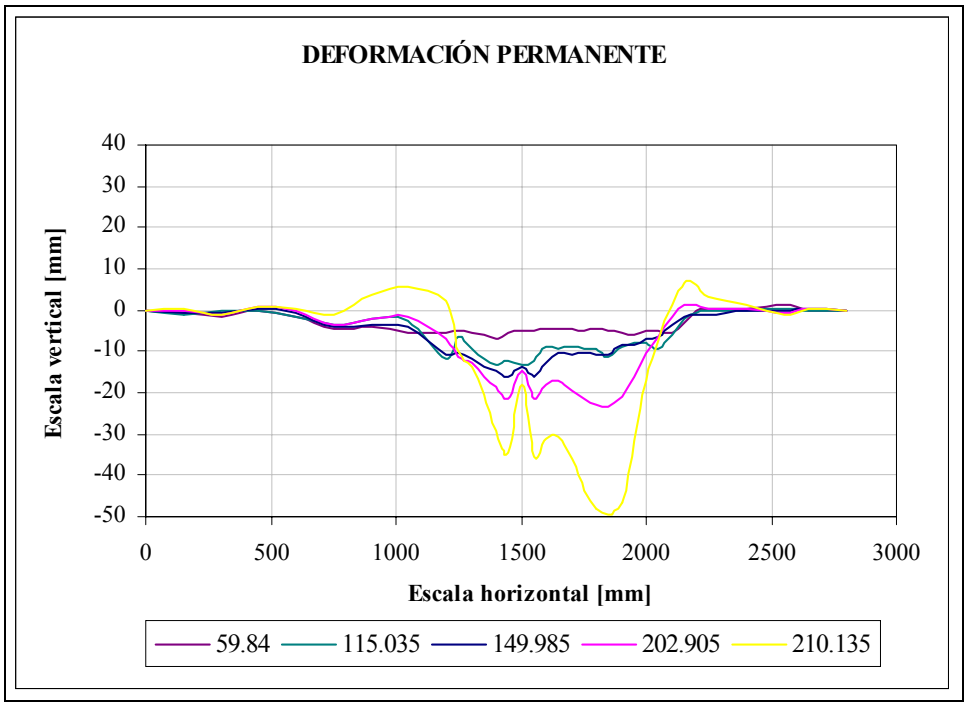


Figura 7.7. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 3, diseño MDC-2 sin caucho.

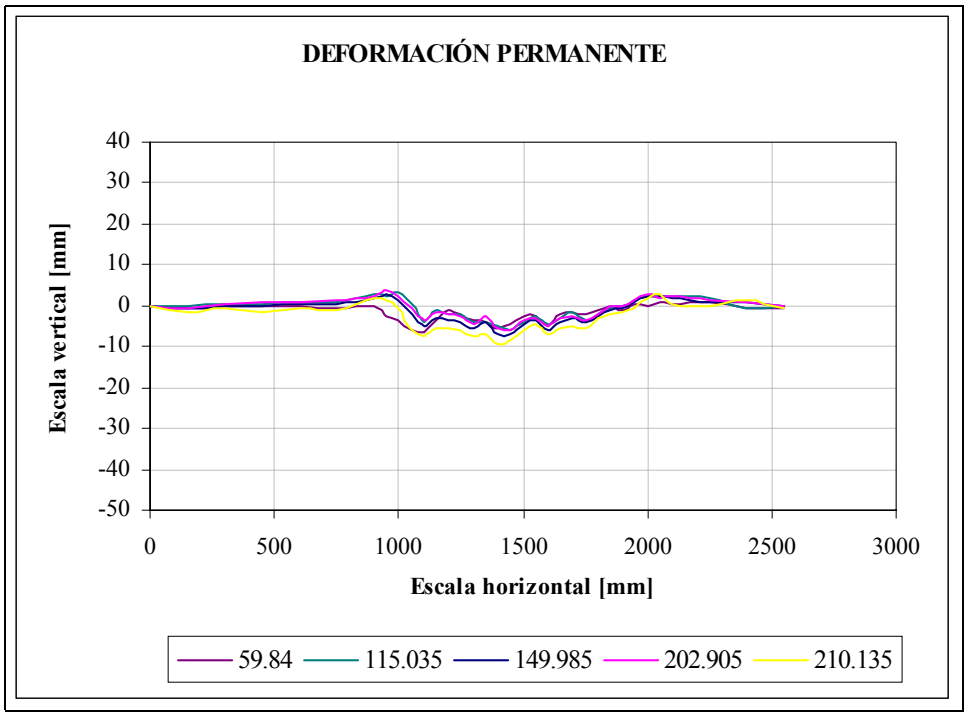


Figura 7.8. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 4, diseño MDC-2 con caucho.

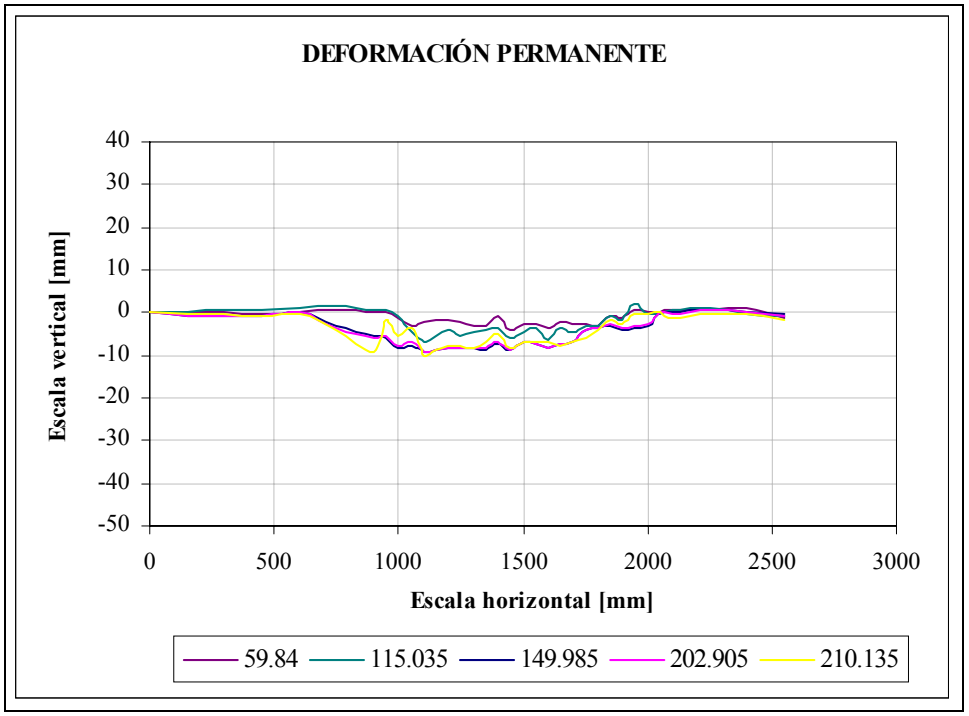


Figura 7.9. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 5, diseño MDC-2 con caucho.

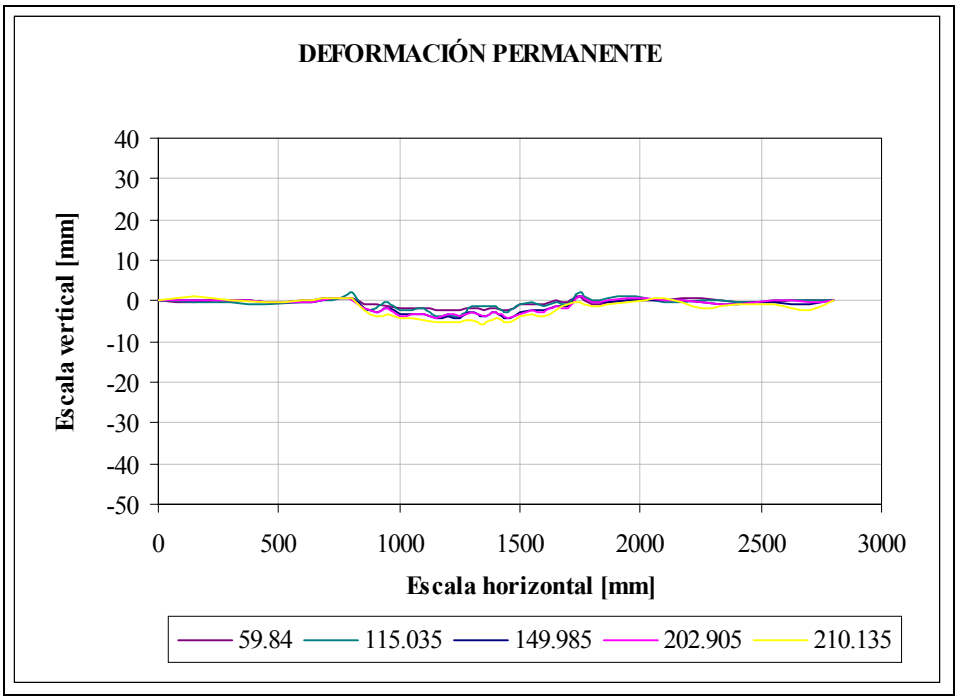


Figura 7.10. Comparación de las curvas de deformación medidas en el eje 6, diseño MDC-2 con caucho.

Fotografía 7.11. Ahuellamiento en el tramo con MDC-2 sin caucho, después de 210.000 repeticiones de carga.

7.4.2 Deflexiones estáticas con Viga Benkelman. Las deflexiones estáticas se midieron periódicamente sobre los seis ejes, con viga Benkelman se obtuvieron los valores de D_0 y D_{25} y se calculó el valor del radio de curvatura haciendo las debidas correcciones por temperatura fT y las relacionadas con la subrasante y el clima fE.

Las deflexiones máximas D_0 en cada eje después de las 210.135 repeticiones de carga de 13 toneladas fueron:

Cuadro 7.3. Deflexiones máximas D_0 obtenidas en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga.

Tipo de Mezcla asfáltica	Eje	Deflexión [10^{-2} mm]
MDC-2 sin caucho	1	222.3
	2	195.8
	3	254.1
MDC-2 Con 1% de caucho	4	144.4
	5	160.8
	6	141.1

Con los resultados de deflexiones máximas D_0 se puede observar que la estructura que mayor deflexión presentó fue la que se conformó con la capa asfáltica fabricada sin caucho. Esta mayor debilidad estructural se puede argumentar sólo en la menor resistencia de la capa de rodadura.

A continuación se presentan gráficos comparativos de la variación del radio de curvatura, deflexión D_0, y relación R_c x D_0 con relación al número de ejes para las dos estructuras estudiadas.

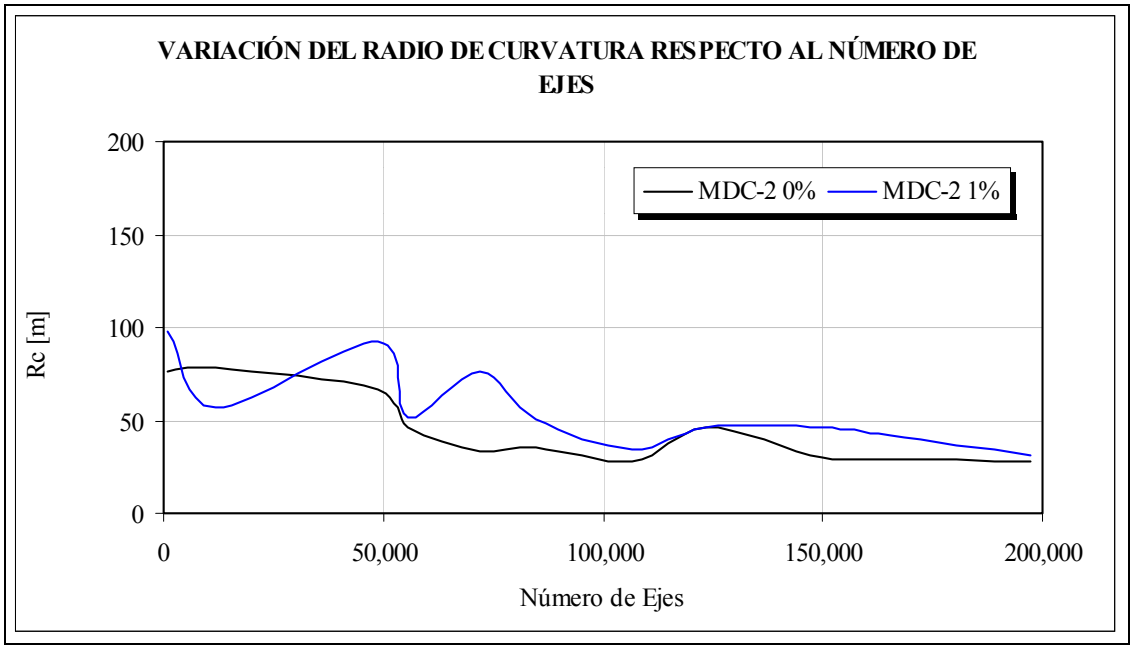


Figura 7.11. Comparación de la variación del radio de curvatura calculado respecto al número de ejes, para las dos estructuras.

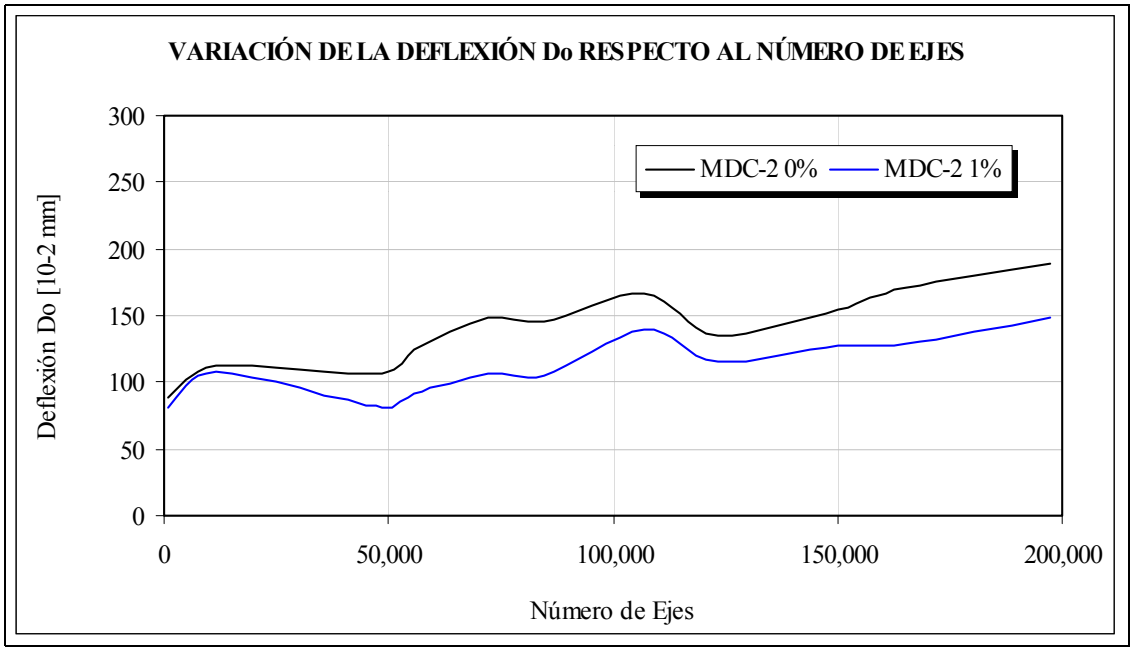


Figura 7.12. Comparación de la variación de la deflexión D_0 medida respecto al número de ejes, para las dos estructuras.

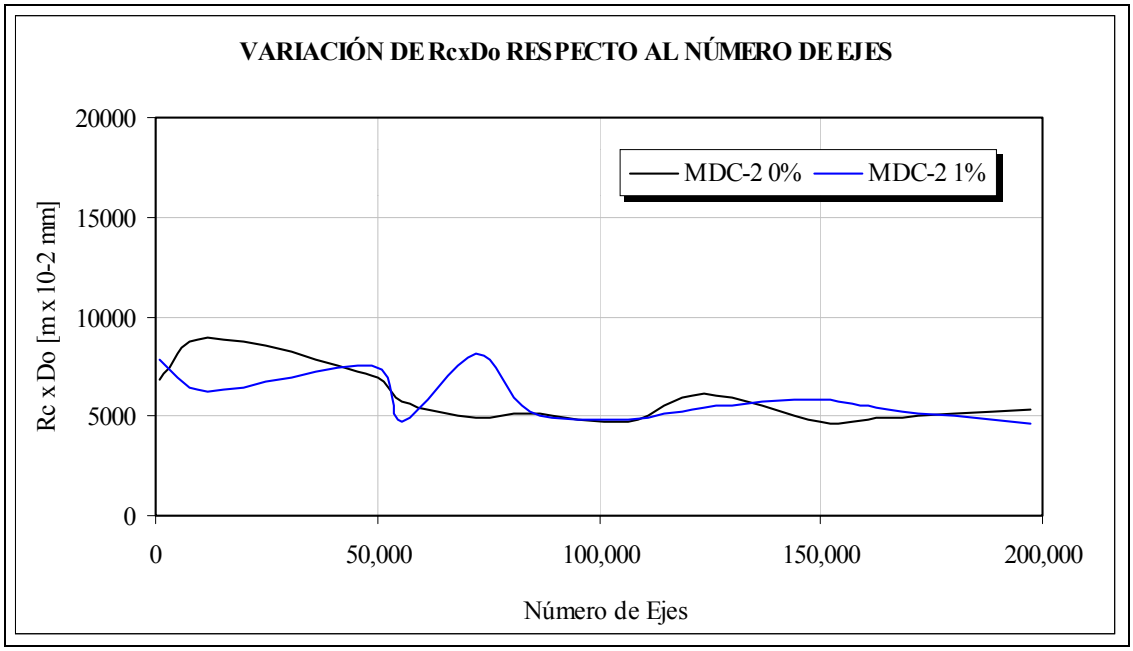


Figura 7.13. Comparación del factor R_cxD_0 calculado respecto al número de ejes, para las dos estructuras.

7.4.3 Densidad de fisuración. La densidad de fisuración se midió después de haber concluido el ensayo a las 210.135 repeticiones de carga. Para medir la densidad de fisuración cada sector del carrusel (la estructura con la mezcla asfáltica mejorada con caucho y la mezcla asfáltica sin caucho) se dividió en áreas pequeñas de un metro cuadrado en los que se registró y midió la longitud de cada fisura, al final se sumó la longitud de todas las fisuras en cada sector y se dividió por el área total.

La presencia de agua proveniente de las lluvias aceleró el proceso de falla en la estructura. Con la entrada de agua por las fisuras y con el paso de las llantas del carrusel se generó la salida de finos de la capa granular ocasionando socavación y posterior hundimiento de la estructura.

Fotografía 7.12. Presencia de finos sobre la carpeta de rodadura provenientes de la capa granular.

Fotografía 7.13. Presencia de finos sobre la carpeta de rodadura provenientes de la capa granular.

Adicionalmente se registró la aparición de las primeras fisuras, donde la primera fisura para la mezcla asfáltica sin cacho apareció después de 70.000 repeticiones de carga, y en la mezcla asfáltica mejorada con caucho apareció después de 100.000 repeticiones; la máxima abertura en las fisuras fue aproximadamente de 6 mm en la mezcla sin caucho y 1 mm en la mezcla con caucho.

Con los resultados de densidad de fisuración se puede observar que la capa asfáltica con mayor fisuración fue la que se conformó con la mezcla asfáltica sin caucho, con un total de 931 cm/m², mientras que la mezcla asfáltica mejorada con caucho solo presentó una densidad de fisuración de 127 cm/m².

Cuadro 7.4. Densidad de fisuración en la estructura del pavimento en cada sección estudiada después de 210.135 repeticiones de carga.

Tipo de Mezcla asfáltica	Sección	Densidad de fisuración [cm/m²]
MDC-2 sin caucho	1	1151
	2	990
	3	1942
	4	1189
	5	1539
	6	1049
	7	737
	8	517
	9	596
	10	499
	11	471
	12	493
MDC-2 1% de con caucho	1	158
	2	65
	3	23
	4	106
	5	193
	6	264
	7	58
	8	42
	9	162
	10	227
	11	94

Fotografía 7.14. Fisuración en el tramo con MDC-2 sin caucho, después de 210.000 repeticiones de carga.

Fotografía 7.15. Fisuración en el tramo con MDC-2 con caucho, después de 210.000 repeticiones de carga.

7.4.4 Control de temperatura. El control de temperatura se realizó cada hora, y sirvió para calcular el factor de corrección por temperatura para el cálculo del radio de curvatura. La mayor temperatura registrada fue de 48°C en la mezcla asfáltica sin caucho, y 45°C en la mezcla asfáltica mejorada con caucho.

8 ESTUDIO AMBIENTAL

Dos importantes análisis relacionados con aspectos ambientales se realizaron sobre las mezclas asfálticas con y sin caucho; el primero fue el estudio de la emisión de compuestos orgánicos volátiles COV mediante cromatografía de gases, y el segundo fue la medición de niveles de ruido ocasionados por la interacción llanta pavimento.

8.1 EMISIÓN DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

8.1.1 Descripción de las muestras analizadas. Se analizaron cinco (5) muestras sólidas identificadas con los números 8904, 8905, 8906, 9060, 9061 y 9062, con el objetivo de establecer la presencia de compuestos orgánicos volátiles. La numeración utilizada corresponde a la asignación entro del ciclo analítico de nuestro laboratorio, en la Tabla 8.1 se podrá encontrar la descripción de las muestras y la composición de las mezclas asfálticas, donde MDC-2 corresponde a una mezcla asfáltica densa en caliente especificada por el Instituto Nacional de Vías.

Tabla 8.1. Muestras analizadas

Muestra	% asfalto	% GCR	% agregados	Numeración Laboratorio	Peso (g) analizado
MDC-2 sin GCR	5.4	0	94.60	8904	30.92
MDC-2 con 1% de GCR	6.5	0.93	92.57	8905	31.80
MDC-2 con 2% de GCR	7.0	1.82	91.18	8906	32.33
Cemento Asfáltico	-	-	-	9060	30.20
Grano de Caucho Reciclado GCR	-	-	-	9061	30.22

8.1.2 Metodología de la prueba de migración. Una porción de 30g de muestra aproximadamente de cada sólido fue colocada en un frasco de vidrio ámbar de 100 mL (ver Tabla 1.), que se tapó empleando un septum de Teflón/silicona (grado cromatográfico) y su respectiva tapa plástica.

8.1.2.1 Extracción de los compuestos orgánicos volátiles (COVs). Las muestras se colocaron atemperar a 50ºC en un baño maría durante 30 minutos. Transcurrido este tiempo se realizó la extracción de los compuestos orgánicos volátiles utilizando la microextracción en fase sólida (SPME), con una fibra de Carboxen/Polidimetilsiloxano de 75µm de espesor (Supelco, Bellefonte, USA). El dispositivo SPME se dejó expuesto a la fase vapor o *head-space* de la muestra sólida durante 15 minutos, como se observa en la Figura 8.1.

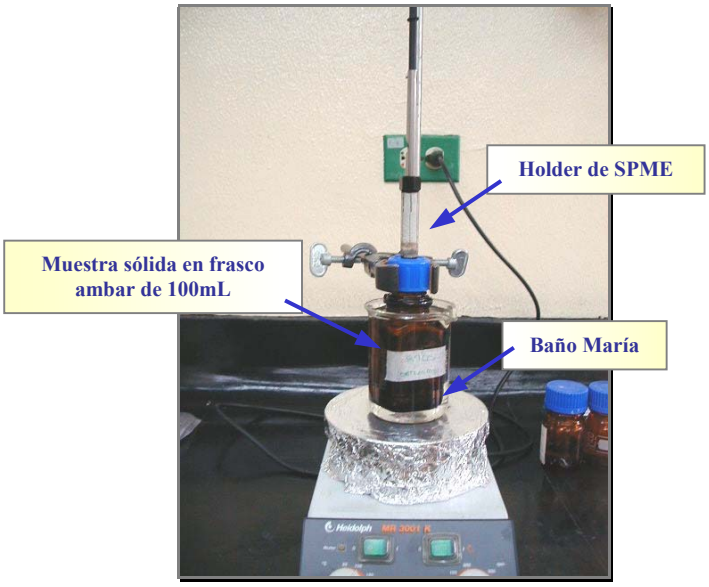


Figura 8.1 Montaje en SPME para muestreo *Head-space*

8.1.3 Análisis por cromatografía de gases/espectrometría de masas. El análisis se realizó en el cromatógrafo de gases HP6890 Series II, dotado con un puerto de inyección split/splitless, una columna DB-624 (6% Cinanopropilfenil - 94% dimetilsiloxano copolímero), de 60m x 0.32mm (diámetro interno) x 1.85µm (espesor de la fase estacionaria) y un detector selectivo de masas (MSD) HP 5971 A operado en el modo de barrido total (full scan). La línea de transferencia y la cámara de ionización se mantuvieron a 260°C y 170°C respectivamente, y un rango de masas m/z=30-600. La programación de temperatura del horno seleccionada fue: 45ºC @ 5ºC/min hasta 250ºC, siendo el tiempo total de análisis de 41 minutos.

La fibra con los analitos absorbidos durante el periodo de extracción fue expuesta en el puerto de inyección operado en el modo splitless (250°C), Fotografía 8.1.

Fotografía 8.1. Exposición de la fibra de SPME en el puerto de inyección del Cromatógrafo de gases con detector selectivo de masas.

Los cromatogramas obtenidos durante el análisis de cada una de las muestras recolectadas (Tabla 8.1) se muestran en el ANEXO D.

8.1.4 Interpretación de los resultados. En los resultados obtenidos del análisis por cromatografía de gases con detector selectivo de masas (MSD) de las muestras 8904 a 8906 y 9060 a 9062 se identifica un amplio grupo de compuestos orgánicos, los que corresponden principalmente a hidrocarburos saturados, compuestos aromáticos, poliaromáticos, y algunas sustancias halogenadas. Estos compuestos se muestran en la Tabla 8.2, donde CA es cemento asfáltico, GCR es grano de caucho reciclado, y 0, 1 y 2% corresponden al porcentaje incorporado de GCR a la mezcla asfáltica.

Tabla 8.2. Compuestos orgánicos identificados en las muestras analizadas

No.	t_R [min]	Compuesto	CA	GCR	0%	1%	2%
			9060	9061	8904	8905	8906
1	7.430	Acetona				+	+
2	8.255	Diclorometano					+
3	9.022	Hexano		+	+	+	
4	10.296	Acetato de etilo			+	+	+
5	11.379	Ácido acético					+
6	12.342	Heptano	+				
7	13.183	Tricloroetileno	+	+	+	+	+
8	13.631	Metilciclohexano				+	+
9	14.717	2-metilheptano	+			+	
10	15.313	4-metil-2-pentanona		+		+	+
11	15.904	Tolueno	+	+	+	+	+
12	16.003	Octano	+				
13	16.921	3-hexanona				+	
14	17.235	2-hexanona				+	+
15	17.531	2-hexanol			+	+	+
16	18.790	3-metiloctano	+			+	
17	19.549	Etilbenceno	+	+	+	+	+
18	19.821	m-xileno	+	+	+	+	+
19	20.909	o-xileno	+	+	+	+	+
20	21.379	Heptanal	+			+	+
21	21.767	2-butoxietanol	+			+	
22	22.088	4-metilnonano	+				
23	22.154	2-metilnonano	+			+	
24	22.451	3-metilnonano	+			+	
25	23.012	Propilbenceno	+			+	
26	23.243	1-etil-3-metilbenceno	+	+	+	+	+
27	23.312	1-etil-2-metilbenceno		+			
28	23.424	Decano	+	+	+	+	+

Continúa...

Continuación Tabla 8.2

No.	t_R [min]	Compuesto	CA 9060	GCR 9061	0% 8904	1% 8905	2% 8906
29	23.774	2-metil-4-octanona				+	+
30	24.084	o-Etiltolueno	+		+	+	+
31	24.265	2,6-dimetilnonano	+			+	+
32	24.562	1,3,5-trimetilbenceno	+	+	+	+	+
33	24.689	5-metil-2-hexanona				+	
34	25.065	Octanal	+			+	+
35	25.238	2-metilpropil ciclohexano	+				
36	25.340	Limoneno				+	
37	25.445	2-isopropiltolueno	+			+	
38	25.560	4-metildecano	+			+	
39	25.667	2-metildecano	+		+	+	
40	25.799	1,2,4-trimetilbenceno	+		+	+	+
41	25.939	3-metildecano	+			+	
42	26.558	1,3-dietilbenceno	+	+	+	+	+
43	26.863	Undecano	+		+	+	+
44	27.382	4-etil-1,2-dimetilbenceno	+		+	+	
45	27.473	4-isopropiltolueno	+		+	+	+
46	27.687	2-etil-1,3-dimetilbenceno	+		+	+	+
47	28.067	1-metil-2-fenilciclopropano	+		+	+	
48	28.529	Nonanal	+			+	+
49	28.858	1,2,3,4-tretametilbenceno	+		+	+	
50	29.032	1,2,4,5-tretametilbenceno	+		+	+	+
51	29.864	2,3-dihidro-5-metil-1H-indeno	+		+	+	
52	30.087	Dodecano	+		+	+	+
53	30.301	1,2,3,5-tretametilbenceno	+				
54	30.346	2,3-dihidro-5-metil-1H-indeno			+	+	
55	30.541	2,6-dimetilundecano	+		+	+	+
56	31.143	2,3-dihidro-1,2-dimetil-1H-indeno	+				
57	31.291	2,3-dihidro-1,6-dimetil-1H-indeno	+				
58	31.382	Pentametilbenceno	+		+		
59	31.464	2,3-dihidro-1,3-dimetil-1H-indeno	+				
60	32.264	Naftaleno	+		+	+	+
61	33.105	Tridecano	+		+	+	+
62	33.369	2,3-dihidro-4,7-dimetil-1H-indeno	+		+	+	+
63	33.691	3,5,24-trimetiltetracontano	+				
64	33.825	Benzotiazol		+		+	+
65	33.905	2,3-dihidro-4,6-dimetil-1H-indeno	+		+		
66	35.364	2,6,11-trimetildodecano	+		+	+	
67	35.612	2-metilnaftaleno	+		+	+	+
68	35.933	Tetradecano	+		+	+	+
69	36.189	1-metilnaftaleno	+		+	+	+
70	38.358	1-etilnaftaleno	+		+	+	

Continúa...

Continuación Tabla 8.2

No.	t_R [min]	Compuesto	CA 9060	GCR 9061	0% 8904	1% 8905	2% 8906
71	38.473	2-etilnaftaleno	+				
72	38.589	Pentadecano	+		+	+	
73	38.696	2,7-dimetilnaftaleno	+		+	+	+
74	39.149	1,8-dimetilnaftaleno	+		+	+	+
75	39.265	1,5-dimetilnaftaleno	+		+	+	
76	39.834	2,3-dimetilnaftaleno	+		+	+	
77	40.296	1,3-dimetilnaftaleno	+				
78	41.244	2,3,6-trimetilnaftaleno	+				
79	42.522	2,3,5-trimetilnaftaleno	+				
80	48.500	Isopropilmiristato	+				

En los datos presentados en la tabla anterior se comprueba que la emisión de compuestos orgánicos volátiles de las mezclas asfálticas proviene principalmente del asfalto, producto petroquímico. En cuanto a los compuestos emitidos por el caucho se presume, que algunos de ellos pudieron haber sido absorbidos durante el tiempo de almacenamiento en el laboratorio. En la Figura 8.2 se presenta gráficamente la comparación de áreas totales de los compuestos identificados en cada una de las muestras analizadas.

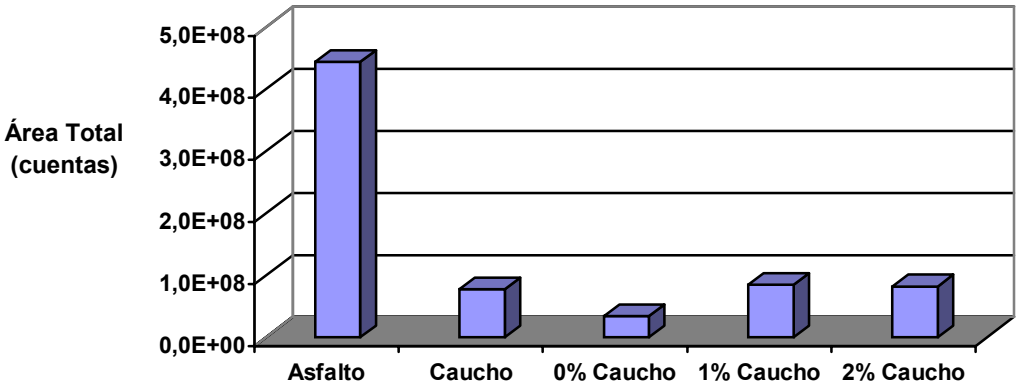


Figura 8.2. Sumatoria de áreas en muestras analizadas.

Se realizó la cuantificación de 13 COVs, para lo cual se utilizaron los datos de calibración obtenidos mediante el análisis de muestras de aire con concentraciones conocidas de trece

diferentes COVs (Mezcla VOCs No. 2, Supelco Cat. No. 4-8777). De estos trece compuestos se encontraron nueve en las muestras, los cuales se presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3. Compuestos cuantificados en las muestras analizadas

No.	Compuesto	t_R (min)	Asfalto	Caucho	0%	1%	2%
			Concentración, ppb				
1	Tolueno	15.91	216,1	276,9	0,7	53,0	17,4
2	Etilbenceno	19.84	425,6	207,8	0	8,1	82,9
3	m-Xileno	19.84	434,0	214,5	31,2	111,8	89,3
4	1,3,5-Trimetilbenceno	23.32	105,4	137,5	3,34	20,4	14,1
5	1,2,4-Trimetilbenceno	24.57	384,8	147,4	30,6	96,3	63,4
6	1,2,4-Triclorobenceno	31.38	83,4	25,74	21,7	29,7	25,4
7	Naftaleno	32.26	306,1	0	32,2	35,1	0
8	p-Isopropiltolueno	25.45	53,7	0	0	40,2	1,7
9	1,3,5-Triclorobenceno	32.77	175,1	0	18,35	46,2	59,0

Con los anteriores resultados se elaboró la siguiente gráfica, donde se observa el mismo comportamiento de las áreas totales para todos los compuestos identificados presentados en la Figura 8.2. Para la interpretación de estas gráficas es necesario tener en cuenta los porcentajes de asfalto y caucho presentes en cada una de las muestras analizadas, pues aunque el caucho actúa como absorbente, una mayor cantidad de asfalto en la mezcla no permite ver claramente la acción del mismo.

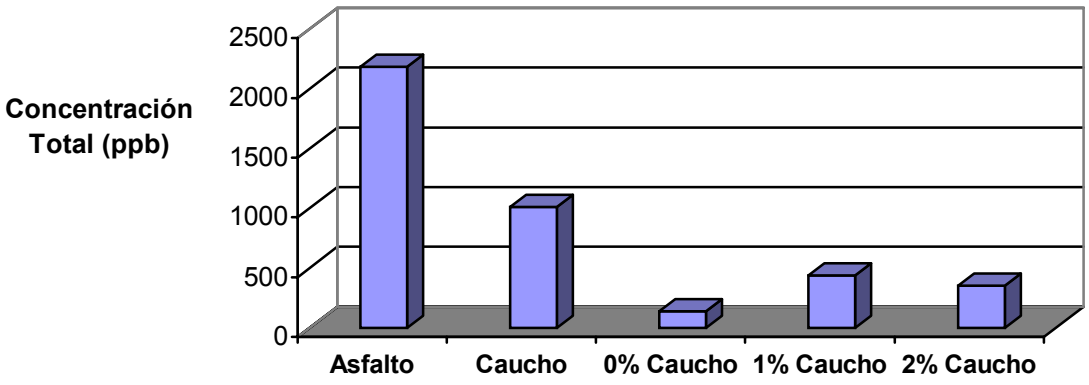


Figura 8.3. Comparación concentración total de compuestos cuantificados.

8.2 EMISIÓN DE RUIDO

El estudio de los niveles de ruido se realizó sobre el pavimento asfáltico colocado en el Carrusel de Fatiga de la Universidad de Los Andes. Las mezclas asfálticas colocadas fueron una MDC-2 sin caucho y una MDC-2 con 1% de caucho.

El equipo usado para medir los niveles de ruido fue un desibelímetro Extech 407735. Con este equipo se midieron los niveles bajos y altos en tres días diferentes.

Figura 8.4. Lectura de niveles de ruido.

Tabla 8.4. Niveles de ruido medidos en el Carrusel de Fatiga.

Número de ejes	Sin GCR		Con GCR	
	Niveles de ruido [db]			
	Alto	Bajo	Alto	Bajo
11.720	94.5	105.6	91.2	101.3
31.040	104.9	104.9	102.2	103.4
69.375	97.0	104.0	94.2	98.0

De los resultados anteriores se puede observar que aunque la diferencia no es mucha los niveles de ruido en la mezcla asfáltica con caucho son menores que en la mezcla asfáltica sin caucho. Mezclas asfálticas con husos granulométricos abiertos logran una mejor disminución de ruido. El parecido en los valores de ruido tiene que ver en el hecho que las mezclas asfálticas son de igual tipología.

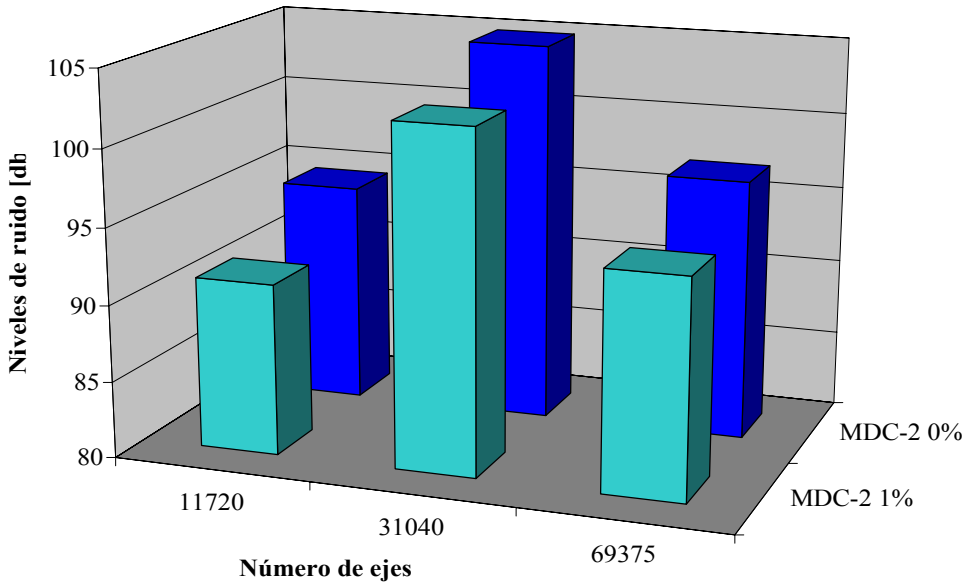


Figura 8.5. Niveles de ruido en el pavimento, niveles altos.

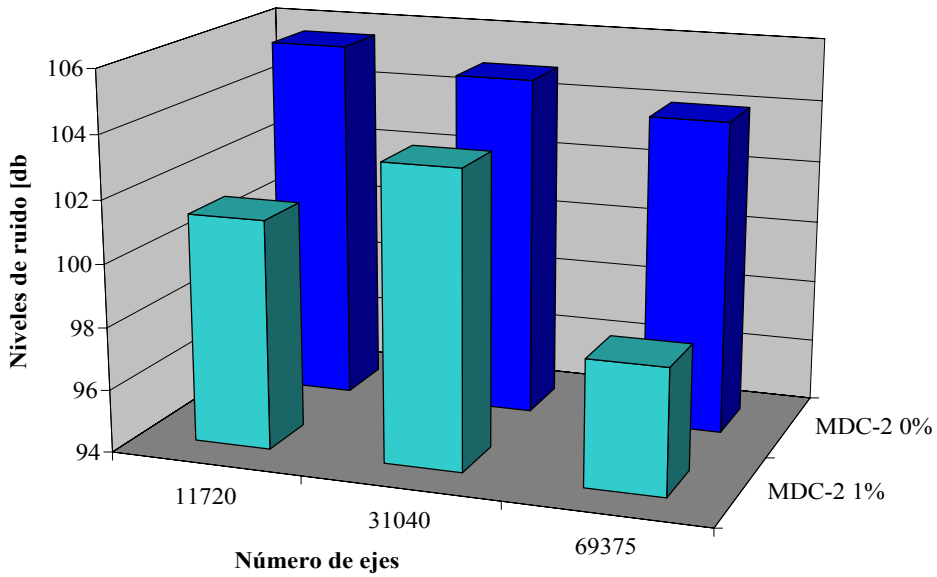


Figura 8.6. Niveles de ruido en el pavimento, niveles bajos.

8.3 UTILIZACIÓN DEL GCR PARA SU USO EN LOS PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.

Del proceso de molienda se obtiene de una llanta de camión aproximadamente 7.5 kg de GCR libre de tela y metal, y 4 kg aproximadamente de las labores de reencauche donde solamente se extrae el caucho que se ubica en la huella de la misma.

Para la vía seca se requiere 1% de GCR sobre el peso total de los agregados, los cuales hacen parte aproximadamente del 93% del total de la mezcla asfáltica, esto da como resultado un total de aproximadamente 0.93% de GCR sobre la mezcla asfáltica total.

Para la vía húmeda se requiere 15% de GCR sobre el peso total del cemento asfáltico, el cual hace parte aproximadamente del 7% del total de la mezcla asfáltica, esto da como resultado un total de aproximadamente 1.05% de GCR sobre la mezcla asfáltica total.

Para calcular el número aproximado de llantas que se procesarían para obtener GCR, se seguiría esta sencilla ecuación:

$$\text{Consumo de llantas para producción de GCR} = \frac{a \times b}{c} \times 1000 \text{ [Llantas/año]}$$

donde:

a es la cantidad de mezcla asfáltica en caliente a producir, expresada en Ton/año.

b es el contenido de GCR en la mezcla asfáltica, este contenido dependerá del proceso a utilizar, así: ***b*** = 0.0093 si se utiliza el proceso seco.
b = 0.0105 se se utiliza el proceso húmedo.

c es la cantidad de GCR que se puede extraer de una llanta, expresada en kg/llanta. ***c*** dependerá del tipo de llanta y del proceso que se utilice. Para llantas de camión el valor de ***c*** podrá ser:
c = 4 kg/llanta si se obtiene de las labores de reencauche,
c = 7.5 kg/llanta si se muele toda la llanta.

9 EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL

Para cada una de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho elaboradas por el proceso seco, y para la mezcla asfáltica con asfalto modificado con caucho se evaluó su vida útil mediante el método racional de diseño de pavimentos.

La evaluación de la vida útil se basó en el número de ciclos obtenidos en el ensayo de fatiga, y el módulo dinámico. Así mismo se supuso una estructura típica y mediante el uso del programa DEPAV se calcularon los esfuerzos y deformaciones que se presentaban en las capas del pavimento.

9.1 ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

Para evaluar las mezclas asfálticas elaboradas mediante el proceso seco se propuso una estructura típica conformada por una capa de rodadura, una capa de base granular y dos capas de subbase granular. Los valores de los módulos y espesores de las capas granulares y de la subrasante son típicos para estos materiales, los valores fueron los siguientes:

Tabla 9.1. Propiedades de los materiales granulares y de la subrasante.

Capa	Módulo [kg/cm²]	μ	Espesor [cm]
Base granular	3000	0.35	20
Subbase granular 1	800	0.35	25
Subbase granular 2	400	0.35	25
Subrasante	200	0.35	-

Todas las capas se consideraron como ligadas.

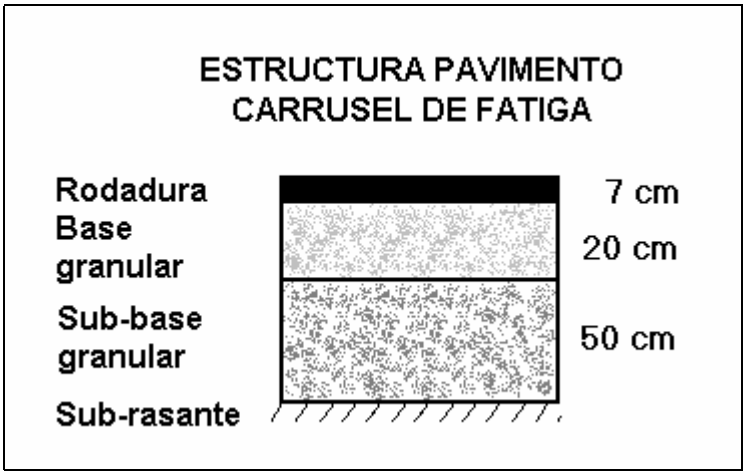


Figura 9.1. Estructura supuesta para el cálculo de la vida útil.

Las siguientes propiedades de las mezclas asfálticas son los resultados de los ensayos de laboratorio como Módulos dinámicos a 25°C y 10Hz, y de la ley de fatiga.

Tabla 9.2. Propiedades de las mezclas asfálticas.

Propiedad	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%	McDonald
ε_6	129E-6	131E-6	88E-6	145E-6	169E-6	199E-6	397E-6
E [kg/cm²]	58832	25150	11689	40500	28285	19278	17779

El valor de **b** se consideró como –1/5, el cual es un valor típico de una mezcla asfáltica para capa de rodadura, y μ de 0.35.

Siendo el objeto de análisis la capa de rodadura conformada por las diferentes mezclas asfálticas estudiadas, al evaluar las diferentes estructuras con el DEPAV lo que interesa es la deformación relativa de tracción por flexión ε_t en la base de la capa de rodadura. Los resultados de ε_t de las diferentes estructuras con los módulos y espesores ya relacionados se presentan en la Tabla 9.3.

Tabla 9.3. Deformación relativa de tracción por flexión ε_t actuante en la base de la capa de rodadura

Propiedad	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%	McDonald
ε_t	287E-6	337E-6	335E-6	314E-6	334E-6	339E-6	338E-6

Los resultados de estos análisis se presentan en el ANEXO E.

9.2 CALCULO DE LA VIDA ÚTIL

La vida útil del pavimento dependerá de la probabilidad de falla, la cual tiene en cuenta el carácter aleatorio del comportamiento de la estructura del pavimento, y del número equivalente de ejes de referencia **NE**. Así, para diferentes valores de probabilidad de falla se calculó el número de ejes equivalentes con ayuda de la ley de fatiga de las mezclas asfálticas y el valor de la deformación por flexión en la base de la capa asfáltica, producto del conjunto de las propiedades de la estructura del pavimento.

$$NE = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_6} \times \frac{1}{Kr \times Ks \times Kc} \right)^{1/b} \times 10^6 \qquad \textbf{Ecuación 9.1}$$

donde:

ε_t : deformación relativa de tracción por flexión en la base de la capa de rodadura.
ε_6 : Deformación de referencia que depende de cada tipo de material.
Kr : Coeficiente que ajusta el esfuerzo admisible a la probabilidad de falla.
Ks : Coeficiente de reducción que tiene en cuenta la heterogeneidad del suelo de subrasante.
Kc : Coeficiente de calibración entre las medidas en laboratorio y los resultados in situ.
b : Pendiente de la ley de fatiga del material considerado en escala bilogarítmica..

$$Kr = 10^{-u \times b \times \delta}$$ **Ecuación 9.2**

donde:

u : Fractil de ley normal centrada el cual está directamente ligado al riesgo y se expresa en función de la desviación estándar.

δ : Desviación estándar de una variable aleatoria que combina la dispersión encontrada en los ensayos de fatiga en el laboratorio y la dispersión de los espesores de las capas in situ.

Para cada valor de la probabilidad de falla hay un valor de **U**, como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 9.4. Fractil de la ley normal centrada.

Pf[%]	1	5	10	15	20	25	30	35	45	50	60	70	80	90	99.5
U	-2.33	-1.65	-1.28	-1.035	-0.84	-0.67	-0.52	-0.385	-0.125	0	0.25	0.52	0.84	1.28	2.58

$$\delta = \sqrt{\sigma_N^2 + \sigma_H^2 \times \left(\frac{C}{b}\right)^2}$$ **Ecuación 9.3**

donde:

σ_N : Desviación estándar de la ley de fatiga expresada en logaritmo decimal del número de ciclos.

σ_H : Desviación estándar de los espesores del material colocado in situ.

C : Coeficiente adimensional que depende del material considerado.

Tabla 9.5. Valores de los coeficientes y parámetros considerados.

Parámetro	Valor
σ_N	0.25
σ_H	1 cm
C	0.02
Ks	1/1.2
Kc	1.1

Cuadro 9.1. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para los diseños MDC-1.

Probabilidad de falla	Número de ejes equivalentes de 13 Ton		
	MDC-1 0%	MDC-1 1%	MDC-1 2%
1%	2923	1343	204
5%	4408	2056	305
10%	5486	2580	379
15%	6359	3007	438
20%	7151	3396	492
25%	7909	3770	543
30%	8657	4140	593
35%	9414	4516	644
40%	10193	4904	697
45%	11008	5311	751
50%	11874	5745	810
60%	13832	6730	941
70%	16286	7971	1105
80%	19716	9718	1333
90%	25699	12791	1730
99.5%	56050	28706	3726

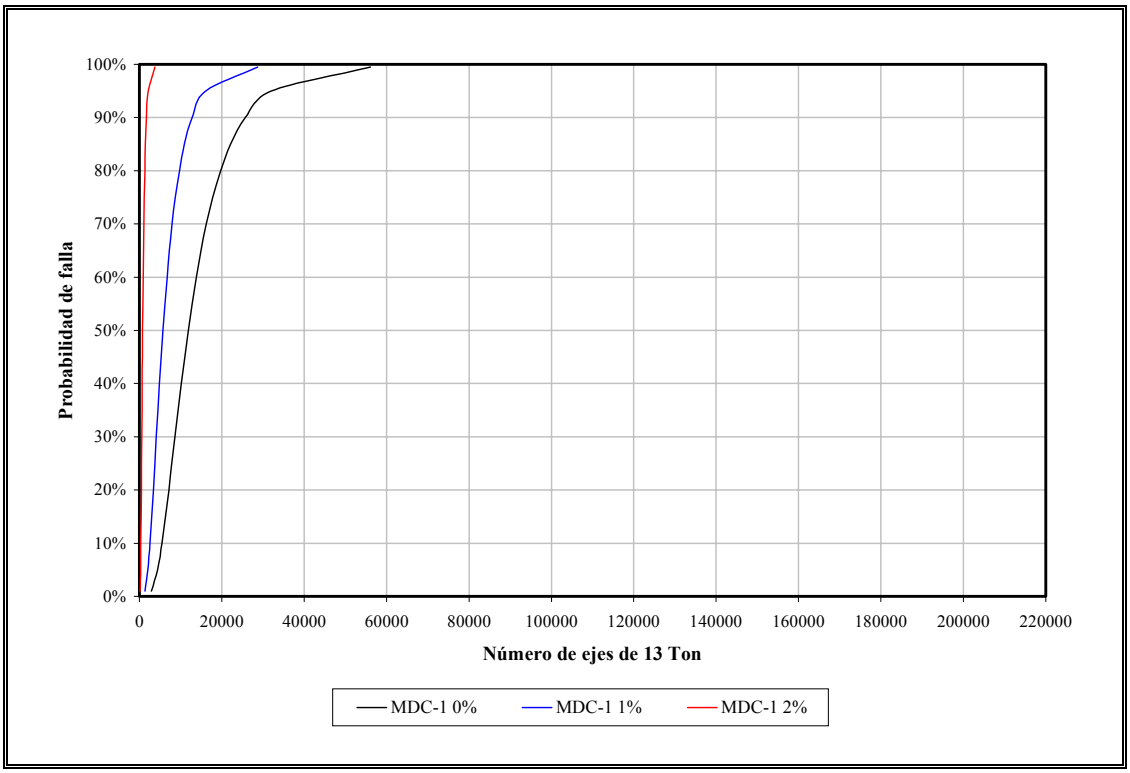


Figura 9.2. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños MDC-1.

Cuadro 9.2. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para los diseños MDC-2.

Probabilidad de falla	Número de ejes equivalentes de 13 Ton		
	MDC-2 0%	MDC-2 1%	MDC-2 2%
1%	3143	5163	10696
5%	4827	7838	16305
10%	6067	9791	20415
15%	7079	11378	23759
20%	8002	12820	26802
25%	8890	14201	29722
30%	9770	15569	32615
35%	10664	16953	35545
40%	11588	18381	38570
45%	12557	19876	41740
50%	13591	21466	45115
60%	15940	25070	52772
70%	18905	29598	62408
80%	23083	35945	75941
90%	30446	47062	99700
99.5%	68755	103985	222067

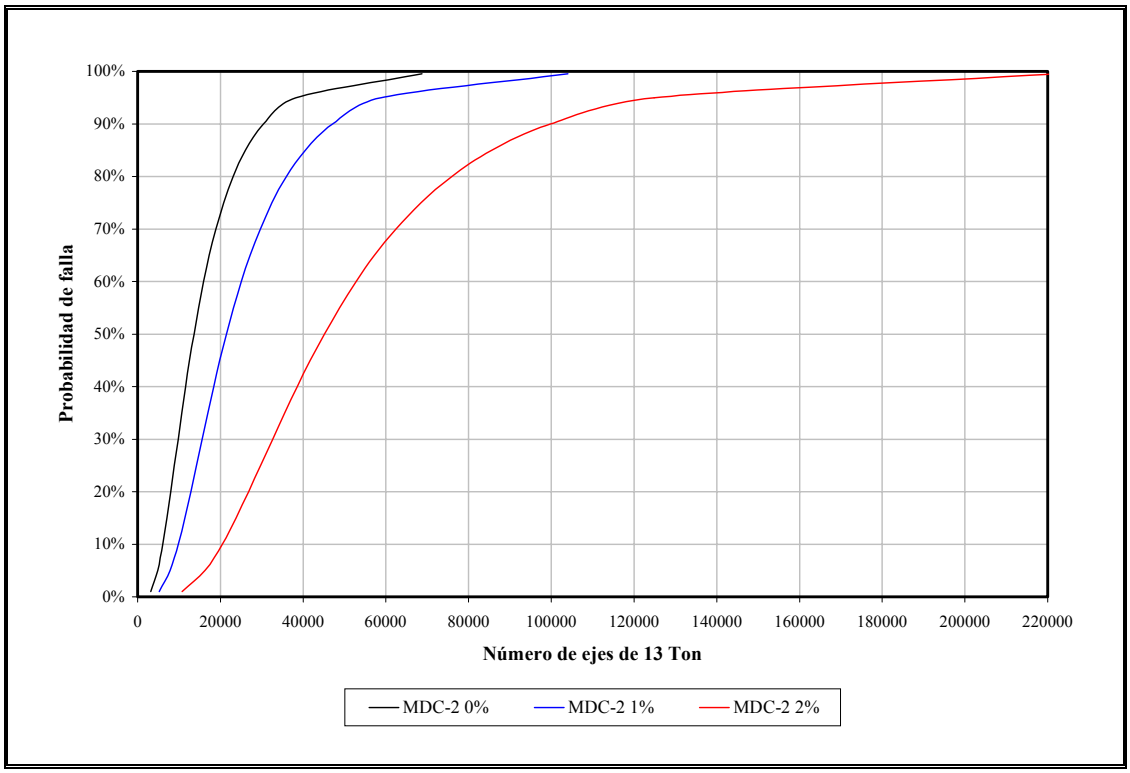


Figura 9.3. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños MDC-2.

Cuadro 9.3. Número de ejes equivalentes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla para el diseño McDonald.

Probabilidad de falla	Número de ejes equivalentes de 13 Ton
1%	373754
5%	555636
10%	686424
15%	791646
20%	886662
25%	977215
30%	1066390
35%	1156272
40%	1248557
45%	1344847
50%	1446859
60%	1676656
70%	1963073
80%	2360992
90%	3049719
99.5%	6476060

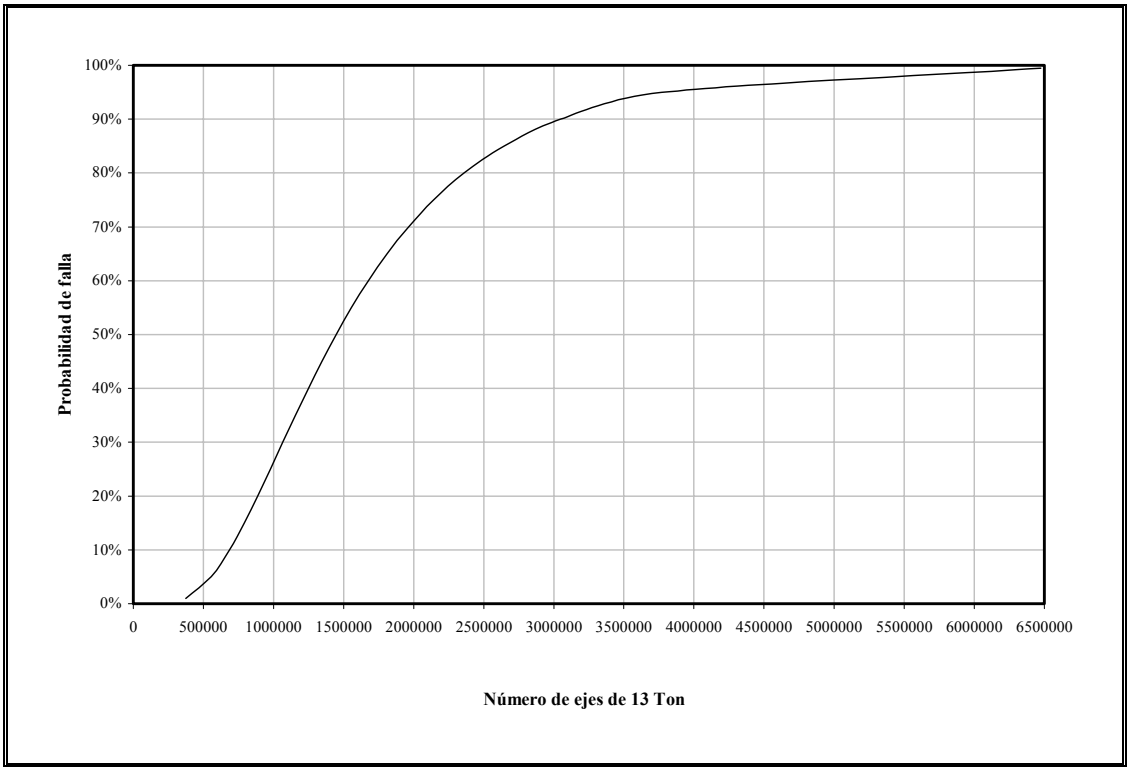


Figura 9.4. Vida útil en ejes de 13 Ton de acuerdo a la probabilidad de falla, para los diseños McDonald.

De los resultados anteriores se puede determinar nuevamente que los diseños MDC-1 no arrojan buenos resultados con la adición del GCR haciendo uso del proceso seco, caso contrario al que presentan los diseños MDC-2. Se observa también que el aplicación del GCR haciendo uso del proceso por vía húmeda da muy buenos resultados.

Se concluye que el empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento cuando este se utiliza haciendo uso tanto del proceso húmedo como del proceso seco, aclarando que estos beneficios dependerán en gran parte de los husos granulométricos que se empleen.

10 CÁLCULO DE COSTOS UNITARIOS

Una vez determinadas las cantidades de materiales que conforman la mezcla asfáltica mejorada con caucho, y los proceso que se requieren para su fabricación, se procedió a evaluar su costo de fabricación y colocación. Para este análisis fue necesario obtener los costos de los materiales, y de los resultados de los ensayos de laboratorio determinar la fórmula de trabajo.

Se encontró que para una mezcla mejorada con caucho los costos se incrementaban por lo siguiente:

- Cantidad adicionada de GCR, tamaño pasa tamiz 30.
- Incremento en un punto (en porcentaje) de la cantidad requerida de cemento asfáltico.
- Labores de premezclado del GCR y los agregados finos, este costo se considera mientras en la planta no se cuente con un equipo especial que mezcle homogéneamente y suministre las cantidades adecuadas de agregado fino y GCR.
- Mayores tiempos de compactación en obra.

El análisis de precios unitarios se realizó para el diseño óptimo determinado en laboratorio, de la mejor mezcla asfáltica mejorada con caucho, la cual fue la mezcla asfáltica tipo MDC-2. Así mismo se realizó el análisis de precios unitarios para la mezcla asfáltica convencional. Este análisis se presenta en el ANEXO F.

A continuación se presenta para cada capítulo una tabla resumen de los precios unitarios por capítulo para cada mezcla asfáltica.

Tabla 10.1. Resumen del análisis de precios unitarios para el equipo mínimo necesario para la fabricación, colocación y compactación de las mezclas asfálticas.

Equipo	Convencional	1% de GCR	2% de GCR
Planta de asfalto	$ 10,931.46	$ 10,931.46	$ 10,931.46
Cargador	$ 1,950.00	$ 1,950.00	$ 1,950.00
Terminadora asfalto	$ 1,072.50	$ 1,072.50	$ 1,072.50
Compactador	$ 926.97	$ 1,853.93	$ 1,853.93
Compactador	$ 926.97	$ -	$ -
Total	$ 15,807.89	$ 15,807.89	$ 15,807.89
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	0.00%	0.00%

Tabla 10.2. Resumen del análisis de precios unitarios para los materiales necesarios para la fabricación de las mezclas asfálticas.

Materiales	Convencional	1% de GCR	2% de GCR
Grava de 5/8"	$ 8,430.72	$ 8,430.72	$ 8,430.72
Gravilla de 3/8"	$ 10,376.28	$ 10,376.28	$ 10,376.28
Arena de rió	$ 7,756.90	$ 7,756.90	$ 7,756.90
Arena de peña	$ 3,663.68	$ 3,663.68	$ 3,663.68
Finos de trituración	$ 1,221.23	$ 1,017.69	$ 814.15
GCR Pasa tamiz 30	$ -	$ 25,931.33	$ 51,862.65
Asfalto sólido	$ 96,786.99	$ 112,397.80	$ 112,397.80
Energía	$ 622.88	$ 622.88	$ 622.88
Combustible	$ 7,683.00	$ 7,683.00	$ 7,683.00
Desperdicios	$ 6,827.08	$ 8,894.01	$ 10,180.40
Total	$ 143,368.76	$ 186,774.29	$ 213,788.47
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	30.28%	49.12%

Tabla 10.3. Resumen del análisis de precios unitarios para el transporte de la mezcla asfáltica a una distancia máxima de 30 km.

Transporte	Convencional	1% de GCR	2% de GCR
Volqueta de 6 m³	$ 7,583.33	$ 7,583.33	$ 7,583.33
Total	$ 7,583.33	$ 7,583.33	$ 7,583.33
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	0.00%	0.00%

Tabla 10.4. Resumen del análisis de precios unitarios para la mano de obra necesaria para la fabricación, colocación y compactación de las mezclas asfálticas.

Mano de obra	Convencional	1% de GCR	2% de GCR
Inspector	$ 506.85	$ 1,013.70	$ 1,013.70
Tornillero	$ 285.20	$ 285.20	$ 285.20
Rastrilleros	$ 570.41	$ 570.41	$ 570.41
Melachero	$ 285.20	$ 285.20	$ 285.20
Ayudantes	$ 615.81	$ 1,231.62	$ 1,231.62
Total	$ 2,263.47	$ 3,386.13	$ 3,386.13
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	49.60%	49.60%

Tabla 10.5. Resumen de los costos directos, indirectos y totales de las mezclas asfálticas.

Costos	Convencional	1% de GCR	2% de GCR
Total costos directos	$ 169,023.46	$ 213,551.65	$ 240,565.82
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	26.34%	42.33%
Total costos indirectos, AIU de 30%	$ 50,707.04	$ 64,065.49	$ 72,169.75
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	26.34%	42.33%
Precio unitario total	$ 219,730.50	$ 277,617.14	$ 312,735.57
Incremento del costo al mejorar con GCR	-	26.34%	42.33%

Del anterior análisis se observa que el costo de los materiales en las mezcla asfálticas mejorada con caucho se incrementa debido a la cantidad de GCR que se adiciona, así como al contenido extra de cemento asfáltico que esta requiere. Añadidamente se incrementan los costos de mano de obra debido a que se requiere personal para que realice la premezcla del caucho con los agregados finos.

11 RELACIÓN BENÉFICO-COSTO

Para un horizonte de tiempo dado, el máximo beneficio de un pavimento se obtiene del conjunto de costos involucrados durante toda su vida como lo son los costos de construcción, mantenimiento y reconstrucción. Por esta razón, desde el punto de vista mecánico, la relación beneficio-costo depende tanto de la vida útil del pavimento como de la probabilidad de falla o confiabilidad escogida durante el diseño.

El análisis de beneficio-costo se realizó para las mezclas asfálticas tipo MDC-2 elaboradas mediante el proceso por vía seca, ya que este proceso es no requiere de grandes cambios en el proceso de fabricación de una mezcla asfáltica convencional, caso contrario al proceso húmedo que requiere de implementación de nuevos equipos y modificaciones en la planta asfáltica.

Tabla 11.1. Cálculo de Beneficio-costo para los diseños MDC-2, proceso seco.

Tipo de Mezcla asfáltica	NE para una probabilidad de falla de 50%	Costos directos, en pesos	Costos por número de ejes equivalente
MDC-2 Convencional	13,591	$ 169,023.46	$ 12.44
MDC-2 con 1% de GCR	21,466	$ 213,243.74	$ 9.95
MDC-2 con 2% de GCR	45,115	$ 240,565.82	$ 5.33

Utilizando un huso granulométrico tipo MDC-2 con 1% de GCR las mejoras en cuanto a beneficio costo se incrementan en un 58%, y usando un contenido de 2% en un 232%. Con este análisis se comprueba que utilizar el GCR mediante el proceso seco, y haciendo uso de una granulometría para mezcla densa en caliente tipo MDC-2, se obtiene un mayor

beneficio costo. En la Figura 11.1 se puede observar cómo disminuye el costo de construcción de una carpeta asfáltica con una mezclas asfálticas MDC-2 a medida que se incorpora GCR para mejorarla.

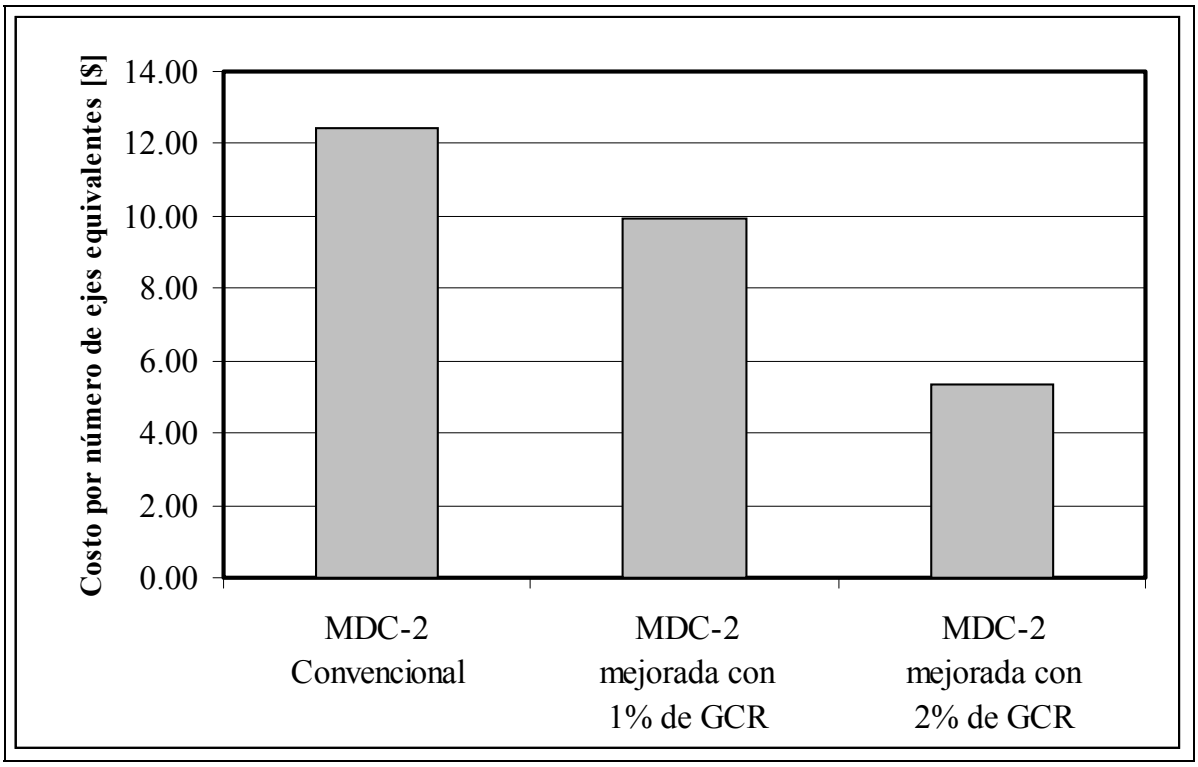


Figura 11.1. Valor de los costos directos por número de ejes equivalentes para las mezclas asfálticas mejoradas con caucho.

12 ESPECIFICACIONES

Las especificaciones para el empleo del grano de caucho reciclado para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas, se elaboraron con base al Reglamento del Sector Vial Urbano para Bogotá, RSV 2002, a las Especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS, a las Especificaciones de CALTRANS, y a la experiencia obtenida en el empleo del GCR alrededor del mundo. Estas especificaciones se encuentran en el ANEXO G.

13 CONCLUSIONES

13.1 GENERALES

- El grano de caucho reciclado (GCR) obtenido de llantas usadas puede ser utilizado confiablemente para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como un agregado (proceso seco) ó como un modificador del ligante (proceso húmedo).
- El GCR utilizado tanto por el proceso húmedo como por el proceso seco mejora la resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas, sin embargo hace que los módulos disminuyan y la deformación plástica aumente con relación a la mezcla convencional, pero permaneciendo los valores obtenidos dentro de los admisibles especificados para este tipo de material.
- Entre menor sea el tamaño máximo del GCR que se utilice para mejorar las mezclas asfálticas ó modificar el ligante serán mejores los resultados obtenidos.
- Se puede trabajar con husos granulométricos convencionales para la fabricación de mezclas asfálticas mejoradas con caucho.
- El empleo del GCR incrementa la vida útil de un pavimento. Para el proceso por vía seca, en el diseño MDC-2 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 haciendo uso de la vía seca. La vida útil que se logra en un pavimento haciendo uso del proceso húmedo es superior a la obtenida mediante el proceso por vía seca.
- Los costos de una mezcla asfáltica mejorada con GCR son mayores que los de una mezcla asfáltica convencional, aproximadamente un 26% cuando se utiliza 1% de GCR, y 42% cuando se utiliza el 2% por la vía seca.

- La relación beneficio-costo se incrementa al utilizar GCR en mezclas asfálticas. El costo por eje en un pavimento puede disminuirse hasta un 20% cuando se emplea 1% de GCR, y hasta un 57% utilizando 2% de caucho por la vía seca.
- El GCR contenido en una mezcla asfáltica no incrementa la emisión al ambiente de compuestos orgánicos volátiles.

13.2 ESPECÍFICAS

13.2.1 Respecto al cemento asfáltico modificado con caucho

- Los contenidos de GCR óptimos para modificar los ligantes de Apiay y Barrancabermeja fueron respectivamente de 13% y 15% con relación al peso de los mismo.
- El grado de desempeño para el ligante de Apiay pasó de PG58-22 a PG88-16 al modificarlo con un contenido de 13% de GCR.
- El grado de desempeño para el ligante de Barrancabermeja pasó de PG58-16 a PG76-22 al modificarlo con un contenido de 15% de GCR.
- El cemento asfáltico de Apiay modificado con 13% de GCR presenta mejores condiciones reológicas que lo favorece para controlar mas adecuadamente los mecanismos de falla como deformación permanente, fatiga y fisuramiento térmico.
- Dentro de las propiedades reológicas generadas al modificar el cemento asfáltico con GCR se incrementan la rigidez (módulo viscoelástico) y la componente elástica (menor ángulo de fase).
- La viscosidad Brookfield de los ligantes modificado con GCR son mucho más altas que las de los ligantes sin modificar, esto se debe a que el caucho cambia las propiedades de la mezcla resultante. En el proceso de mezclado el GCR absorbe parte de los Maltenos del cemento asfáltico, adicional a esto el ligante pierde volátiles por el proceso de modificación al someterlo a altas temperaturas por largos

periodos de tiempo. Este aspecto puede proporcionar una interfase más robusta del nuevo ligante, con la consecuente mejora en la durabilidad de la mezcla asfáltica.

- El cemento asfáltico de Apiay por tener un menor contenido de Maltenos, lo que se traduce en un ligante más duro y viscoso, resulta ser más susceptible que el de Barrancabermeja a aumentar su viscosidad con la adición de GCR. Lo que significa que para un mismo contenido de GCR el ligante de Apiay presenta valores de viscosidad más altos que el de Barrancabermeja.
- La pérdida de masa disminuye en los ligantes modificados con GCR al compararlos con los ligantes sin modificar, en razón a la menor cantidad de Maltenos libres con que se dispone.
- El GCR en el ligante aumenta la recuperación elástica y el punto de ablandamiento, y disminuye la ductilidad y la penetración, aspecto éste relacionado con el incremento de la viscosidad.
- En un cemento asfáltico modificado con caucho el GCR tiende separarse del ligante cuando este se encuentra en reposo, por lo que el almacenamiento debe hacerse manteniendo la agitación.

Debe aclararse que los resultados obtenidos en las mezclas asfalto-caucho seleccionadas se lograron con un porcentaje determinado de GCR. Es posible que la tendencia de los resultados cambie con cantidades diferentes de GCR o con las características del ligante.

13.2.2 Respecto a las mezclas asfálticas mejoradas con caucho

- El huso granulométrico utilizado para la elaboración de mezclas asfálticas mejoradas con caucho que mejores propiedades mecánicas presentó fue el MDC-2, sin que se consideren negativas las obtenidas con el MDC-1.

- Para la MDC-2, el contenido óptimo de GCR con el cual se obtuvieron valores de módulos, fatiga y deformación plástica dentro de los valores especificados es de 1%.
- En la mezcla asfáltica mejorada con GCR se incrementan el contenido de vacíos con aire y el contenido de vacíos en los agregados minerales.
- A medida que se incorpora mayor cantidad de GCR en la mezcla asfáltica, la Estabilidad tiende a disminuir, y el Flujo a aumentar.
- El contenido óptimo de ligante en una mezcla asfáltica aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de adición de GCR, debido a la absorción de ligante que éste produce.
- El ensayo de deformación permanente indica que las mezclas con caucho son mas deformables, lo que se corresponde con el valor de los módulos dinámicos. En el proceso seco, las velocidades de deformación en el intervalo de 105 a 120 minutos llegan a ser mejores en los diseños con bajos contenidos de GCR (1%), que en las mezclas convencionales. Esto comprueba que la deformación permanente no es un problema.
- Los valores de módulos dinámicos señalan 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 temperaturas.
- Las mezclas asfálticas mejoradas con GCR se diseñaron mediante el procedimiento Marshall para determinar el contenido óptimo de ligante, evaluando el contenido de vacíos con aire, la Estabilidad y el Flujo; y el contenido óptimo de GCR mediante evaluación dinámica con ensayos de deformación permanente, resistencia a la fatiga y módulos dinámicos. El contenido óptimo de ligante también puede ser determinado con evaluación de módulos dinámicos y compacidad de la mezcla asfáltica.
- Las pruebas en el Carrusel de Fatiga señalan una mayor vida útil de la mezcla mejorada con caucho, en relación a la convencional.
- La fabricación de las mezclas asfálticas mejoradas con caucho no requiere de grandes cambios en la planta asfáltica, resultando muy sencillo el proceso de elaboración de la misma.

13.2.3 Respecto a las mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con caucho

- El contenido óptimo de asfalto modificado con caucho fue de 6.9% para lograr un contenido de vacíos con aire de 3%. Sin embargo, para este contenido de ligante y empleando el huso granulométrico recomendado por CALTRANS el valor de los módulos decrece significativamente encontrándose por fuera de los valores especificados.
- La deformación permanente es significativamente alta comparada con las obtenidas en el proceso seco, situación que se debe en gran parte a la granulometría usada y en menor proporción al ligante modificado con GCR. Otra de las causas fue el alto contenido de ligante utilizado, lo cual hizo que el módulo de la mezcla asfáltica resultara demasiado bajo.
- El comportamiento a la fatiga es muy bueno, mucho mejor que los resultados obtenidos en el proceso seco. La deformación de referencia ε_6 mejora casi en un 100%, sin embargo la pendiente b se incrementa.
- El ligante modificado con GCR debe diseñarse controlando la viscosidad Brookfield, la penetración y el punto de ablandamiento. Las mezclas asfálticas elaboradas con ligante modificado con GCR se diseñaron mediante evaluación de módulos dinámicos y contenido de vacíos con aire.

14 RECOMENDACIONES

Puesto que la calidad de los ligantes nacionales cambia constantemente, se recomienda efectuar los ensayos de laboratorio requeridos para determinar el comportamiento de los mismos con la adición de GCR, para lo que se sugiere seguir el programa metodológico desarrollado en la presente investigación. Cuando cambien las propiedades de los materiales se debe procurar diseñar nuevamente las mezclas asfálticas.

Es preciso controlar las Estabilidades y los Flujos Marshall en las mezclas asfálticas cuando se adiciona GCR para que no se presenten problemas de deformabilidad, adicionalmente los criterios Marshall deben ser reconsiderados.

En caso de que se quiera conservar la mezcla asfalto-caucho a altas temperaturas para un posterior uso, es necesario mantenerla en agitación constante, y no debe se utilizada después de haber transcurrido 48 horas de su fabricación.

Se deben buscar nuevos husos granulométricos para elaborar mezclas asfálticas con asfalto modificado con GCR que cumplan con las propiedades mecánicas especificadas, considerando criterios de diseño y granulometrías especificadas por las entidades estatales competentes para tal fin.

En la modificación de ligantes con caucho es conveniente estudiar los beneficios que se pueden obtener al emplear tamaños de grano mucho más fino al utilizado en este estudio.

Es conveniente revisar el procedimiento del ensayo de deformación plástica, ya que la temperatura a la que se realiza este se encuentra por encima del punto de ablandamiento de los ligantes nacionales, situación que hace muy deformable la mezcla asfáltica.

15 BIBLIOGRAFÍA

ASPHALT RUBBER 2000. (1° : 2000 : Vilamoura). Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference. Braga : Barbosa & Xavier, 2000. 711 p.

COLOMBIA, Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente. Diagnóstico ambiental sobre el manejo actual de llantas y neumáticos usadas generadas por el parque automotor de Bogotá. En Gestión de residuos en Bogotá. Bogotá D.C. : DAMA, 2000. p. 51-69

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Especificaciones generales de construcción de carreteras. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Normas de ensayo de materiales para carreteras, Tomo II. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto Nacional de Vías. Normas de ensayo de materiales para carreteras, Tomo III. Bogotá D.C. : Impreandes Presencia S.A, 1998.

COLOMBIA, Instituto de Desarrollo Urbano. Manual de diseño de pavimentos para Bogotá D. C.. Bogotá : Universidad de Los Andes, 2000. 188 p.

ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. Crumb rubber modifiers (CRM) in asphalt pavements : Structural design of pavements containing CRM materials interim report. Corvallis : FHWA, 1995. 88 p. ISBN FHWA-95-00035-XX.

ESTADOS UNIDOS. Federal Highway Administration. State of the practice – Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. Washington : FHWA, 1992. 118 p. ISBN FHWA-92-022

ESTADOS UNIDOS. California Department of Transportation. California special provision : Gap-graded Asphalt Rubber. En : Federal Highway Administration. FHWA, 1995.

http://tti.tamu.edu/researcher/v34n2/pavecure.stm. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.allstatesasphalt.com/nf-sv-6.htm. Ultima visita Octubre de 2001.

http://www.asphalt.com/emulsions/rubber.html. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.autoreporte.com.ar/michelin.htm. Última visita Junio de 2002.

http://www.bei-emulsions.com/rubber.htm. Ultima visita Noviembre de 2001.

http://www.carreteros.org/pg3/articulos/5/iv/a_542b.htm. Ultima visita Julio de 2002.

http://www.carreteros.org/firmes/6_1y2ic/apartados/3_1.htm. Ultima visita Julio de 2002.

http://www.ces.clemson.edu/arts/. Ultima visita Octubre de 2002.

http://www.consulpav.com/AR2000/. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.dama.gov.co/publnew/plaz/plaz5.htm. Ultima visita Octubre de 2001.

http://www.dot.state.tx.us/insdtdot/orgchart/gsd/recycle/projects.htm. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.e-asfalto.com/aditivos/aditivos.htm. Ultima visita Marzo de 2002.

http://www.ecopetrol.com.co/ecop/catalogo/index.htm. Ultima visita Mayo 2002.

http://www.enviroaccess.ca/fiches_4/F4-04-95a.html. Ultima visita Noviembre de 2001.

http://es.epa.gov/new/contacts/newsltrs/ctc/ctc0794.html. Ultima visita Septiembre de 2002.

http://www.graniterock.com/products/technotes/tn744.htm. Ultima visita Octubre de 2001.

http://www.infratech.com/rubarb.htm. Ultima visita Octubre de 2002.

http://www.isri.org/industryinfo/rubber.htm. Ultima visita Noviembre de 2002.

http://www.ldsr.com/productserv/recovery/asphalt_rubber.htm. Ultima visita Enero de 2002.

http://www.miexamen.com.mx/Materiales%20compuestos.htm. Ultima visita Noviembre de 2002.

http://www.recycle.net/assn/rs000199.html. Ultima visita Mayo de 2002.

http://www.rilaic.com/puertos.htm. Ultima visita Noviembre de 2001.

http://www.rubberpavements.org/library/sacramento_noise_study/outside.html. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.rubberpavements.org/. Ultima visita Abril de 2002.

http://www.rubberpavements.org/library/lcca_australia/. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.rubberpavements.org/library/fp25_index.asp. Ultima visita Mayo de 2002.

http://www.tfhrc.gov/pubrds/spring97/crum.htm. Ultima visita Mayo de 2002.

http://www.tfhrc.gov/pubrds/pr97-10/p52.htm. Ultima visita Febrero de 2002.

http://www.uc.org.uy/edi0499.htm. Ultima visita Octubre de 2002.

http://www.upc.es/op/castella/noticies/acinvestigacion/1997/Neumaticosrecicladosasfaltadocarreteras.html. Ultima visita Marzo de 2002.

http://www.uwm.edu/Dept/CBU/abstracts/1995-02.html. Ultima visita Abril de 2002.

http://www.wsdot.wa.gov/ppsc/research/onepages/wa-rd4451.htm. Ultima visita Febrero de 2002.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 38 p. (NTC 1486).

_____ Documentación. Numeración de divisiones y subdivisiones en documentos escritos. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 4 p. (NTC 1075).

_____ Documentación. Citas y notas de pie de página. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 7 p. (NTC 1487).

_____ Documentación. Referencias bibliográficas para libros, folletos e informes. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 15 p. (NTC 1160).

_____ Documentación. Referencias bibliográficas para publicaciones seriadas. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 20 p. (NTC 1308).

_____ Documentación. Referencias bibliográficas para normas. Santa Fe de Bogotá: ICONTEC, 1997. 6 p. (NTC 1307).

INSTITUTO PANAMERICANO DE CARRETERAS. Antecedentes de los métodos de ensayo de ligantes asfálticos de SUPERPAVE. Lexington : IPC, 1994. 89 p

SÁNCHEZ DE GUZMÁN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. 2 *ed*. Santa Fe de Bogotá: Brandar, 1993. 349 p.

ANEXO A. DEFINICIONES

Agregado: Es cualquier material duro, material mineral como la grava, roca triturada, arena, escoria, etc.

Ahuellamiento: El ahuellamiento es una falla muy común en climas cálidos, y resulta de la deformación permanente por flujo lateral de tipo plástico de la mezcla asfáltica bajo las huellas de las llantas de los vehículos. El diseño de la mezcla y la consistencia del cemento asfáltico que se utiliza son factores determinantes en la prevención de este fenómeno que puede atentar contra la seguridad del usuario y acelerar el deterioro estructural.

Asfalto modificado: El asfalto modificado es el cemento asfáltico al cual se altera su composición química mediante la utilización racional y técnica de modificadores. Los modificadores son frecuentemente sustancias macromoleculares que tienen un efecto directo sobre el cemento asfáltico. Las sustancias que se utilizan con mayor frecuencia son elastómeros SBS, los plastómeros EVA y el caucho molido. Estas modificaciones tienen por objeto reducir la susceptibilidad térmica del asfalto y mejorar sus característics de resistencia a la fatiga.

Caucho modificante: Conocido como GCR, Grano de Caucho Reciclado, es el caucho molido proveniente de llantas desechadas usado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en otras aplicaciones de pavimentación.

Cemento asfáltico: Conocido también como asfalto ó ligante, es un material cementante refinado de color café a negro que es ampliamente usado en la industria de la pavimentación. Es un material semisólido a temperatura ambiente y líquido a altas temperaturas.

Cemento asfáltico modificado con caucho: Denominado como asfalto-caucho, se elabora mediante el proceso húmedo, y es definido por la American Society for Testing Materials, ASTM D8-88, como: "una mezcla de cemento asfáltico, caucho reciclado de llantas, y ciertos aditivos en la cual los componentes de caucho son por lo menos el 15% del peso total de la mezcla y han reaccionado en el cemento asfáltico caliente lo suficiente para causar el hinchazón de las partículas de caucho".

Desprendimiento superficial de partículas: El desprendimiento superficial de partículas de agregado en una mezcla asfáltica en algunos casos puede estar ligado a la composición química del cemento asfáltico utilizado. Los ligantes pueden sufrir alteraciones durante el proceso de mezclado en planta, aunque se haya realizado un excelente control de calidad. Lo anterior, unido a un alto contenido inicial de vacíos hace que el asfalto se envejezca prematuramente, perdiendo parte de su poder cohesivo y tenacidad para evitar que las partículas se separen de la superficie.

Fisuramiento: El fisuramiento puede o no estar relacionado a las cargas del tránsito. El fisuramiento asociado a las cargas se denomina fisuramiento por fatiga o piel de cocodrilo, y está relacionado con el grado de rigidez del asfalto a temperaturas medias y bajas de servicio, y son ocasionadas por la repetición de cargas que inducen esfuerzos a tracción mayores a la capacidad del material. El fisuramiento no asociado a las cargas del tránsito se manifiesta por una fisura transversal en la capa de rodadura que se inicia en la superficie, y con el tiempo se propaga hacia abajo. Se generan por altos gradientes de temperaturas entre la parte superior e inferior de la capa a temperaturas bajas de servicio, lo que hace que

se desarrollen grandes esfuerzos de tensión al contraerse. Si la magnitud de esos esfuerzos excede la capacidad de la mezcla, se generan las fisuras transversales para disiparlos. En nuestro país son muy comunes los casos de fisuramiento en capas de rodadura que no han sido sometidas a la acción vehicular relacionadas con este fenómeno.

Por lo general, las fallas a bajas temperaturas son debidas a una combinación de estos dos tipos de fisuramiento, que dependerán de las características reológicas del cemento asfáltico y de su composición química, sin dejar a un lado el manejo que se le ha dado durante el proceso de mezclado en planta.

Mezcla asfáltica: Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.

Mezcla asfáltica mejorada con caucho: Es la combinación de agregados, cemento asfáltico y grano de caucho reciclado, la cual es usada como un material de pavimentación.

Polímero: un polímero es un compuesto formado por adición sucesiva de unidades químicas, moléculas, denominados monómeros. Los materiales plásticos y las gomas son ejemplos de polímeros.

Proceso húmedo: El proceso húmedo es cualquier método en el cual se mezclan las partículas de caucho con el cemento asfáltico antes de adicionar la mezcla resultante a los agregados.

Proceso seco: En el proceso seco se mezcla el caucho con los agregado pétreos antes de adicionar el cemento asfáltico.

ANEXO B. PROCEDIMIENTO PARA LA ELABORACION DE LA MEZCLAS ASFALTICAS MEJORADAS CON GCR POR EL PROCESO SECO EN LABORATORIO

1. Preparar la granulometría de los agregados pétreos.
2. Colocar los agregados pétreos en el horno a una temperatura entre 190 y 218 °C por 12 horas.
3. Preparar la granulometría del Caucho. La proporción del GCR a utilizar estará relacionada con el peso total de los agregados.
4. Calentar el cemento asfáltico a 135°C antes de mezclarlo con los agregados.
5. Los agregados pétreos calientes son mezclados con el caucho y colocados en un horno a 190°C o 218°C por aproximadamente 15 segundos.
6. Adicionar el asfalto caliente a 135°C a la combinación agregados-caucho y mezclar por un tiempo entre 2 y 3 minutos.
7. Colocar la mezcla asfáltica en un periodo de curado de 1 hora a 160°C.
8. La mezcla caliente es compactada en moldes Marshall estándar los cuales han sido precalentados a 135°C.
9. La mezcla caliente es compactada a una temperatura de 129,5°C con 50 golpes en ambos lados.
10. La base del molde debe ser removida inmediatamente después de la compactación, y el molde conteniendo la muestra es colocado en una base de madera de 98 mm de diámetro y 25 mm de espesor. Otra base de madera es colocada en la parte superior de la muestra con un sobrepeso de 2,2 kg. y dejándola reposar por 24 horas antes de extraer la muestra del molde.
11. La muestra es removida del molde con un gato a la temperatura ambiente y colocada en una superficie nivelada antes de la prueba.
12. La gravedad específica y altura de la muestra debe ser medida inmediatamente después de extraerla del molde.

ANEXO C. ANEXO FOTOGRÁFICO CARRUSEL DE FATIGA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Nivel de Subrasante

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Nivel de Sub-base granular

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Nivel de Base granular

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Imprimación

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Finos de trituración

Arena

Grava tam. máx. 3/8”

Grava tam. máx. 5/8”

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Fabricación MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Pesaje finos de trituración

Dosificación finos de trituración

Dosificación GCR

Mezclado finos y GCR

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Fabricación MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Mezcla finos-GCR terminada

Colocación en tolva finos-GCR

Grava tam. máx. 3/8”

Acceso de finos-GCR por la entrada del RAP

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Fabricación MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Salida mezcla asfáltica terminada

Mezcla asfáltica terminada

Transporte mezcla asfáltica

Control de mezcla en planta

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Fabricación MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Colocación MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Compactación MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Colocación MDC-2 con 1% de caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones
en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Compactación MDC-2 con 1% de caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones
en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Carrusel terminado

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Deflexiones

Seguimiento a la fisuración

Deformaciones

Control de temperatura

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Seguimiento y auscultación

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 0%, 70.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 1%, 70.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones
en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 con 1% de caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 0%, 100.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 1%, 100.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 con 1% de caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 0%, 210.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 0%, 210.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones
en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 0%, 210.000 repeticiones

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

MDC-2 1%, 210.000 repeticiones

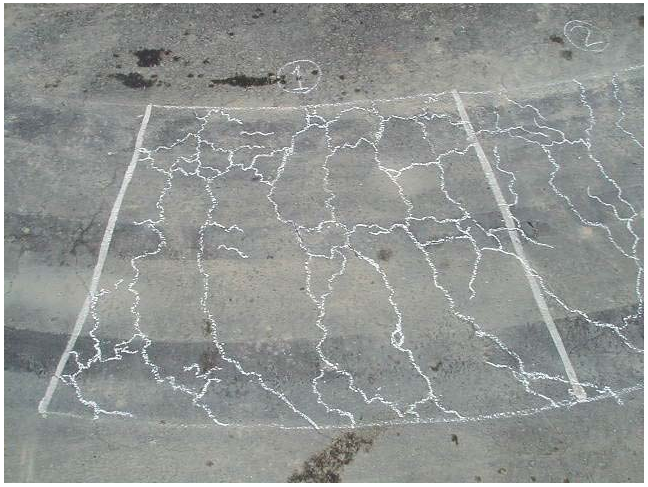
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones
en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Daños MDC-2 con 1% de caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano



Sección 1. 1151 cm/m²

Sección 2. 990 cm/m²

Sección 3. 1942 cm/m²

Sección 4. 1189 cm/m²

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Densidad de fisuración

MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Sección 5. 1539 cm/m²

Sección 6. 1049 cm/m²

Sección 7. 737 cm/m²

Sección 8. 517 cm/m²

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Densidad de fisuración

MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Sección 9. 596 cm/m²

Sección 10. 499 cm/m²

Sección 11. 471 cm/m²

Sección 12. 493 cm/m²

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Densidad de fisuración

MDC-2 sin caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Sección 13. 158 cm/m²

Sección 14. 65 cm/m²

Sección 15. 23 cm/m²

Sección 16. 106 cm/m²

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Densidad de fisuración

MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Sección 17. 193 cm/m²

Sección 18. 264 cm/m²

Sección 19. 58 cm/m²

Sección 20. 42 cm/m²

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
CIMOC
Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles

Carrusel de Fatiga

Densidad de fisuración

MDC-2 con caucho

Alcaldía mayor de Santa fe de Bogotá D.C.

Instituto de desarrollo Urbano

Sección 21. 162 cm/m²

Sección 22. 227 cm/m²

Sección 23. 94 cm/m²

ANEXO D. CROMATOGRAMAS DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

TIC: 9060.D: Cromatograma del análisis de la muestra 9060 (Tabla 3.1), por HRGC/MSD.

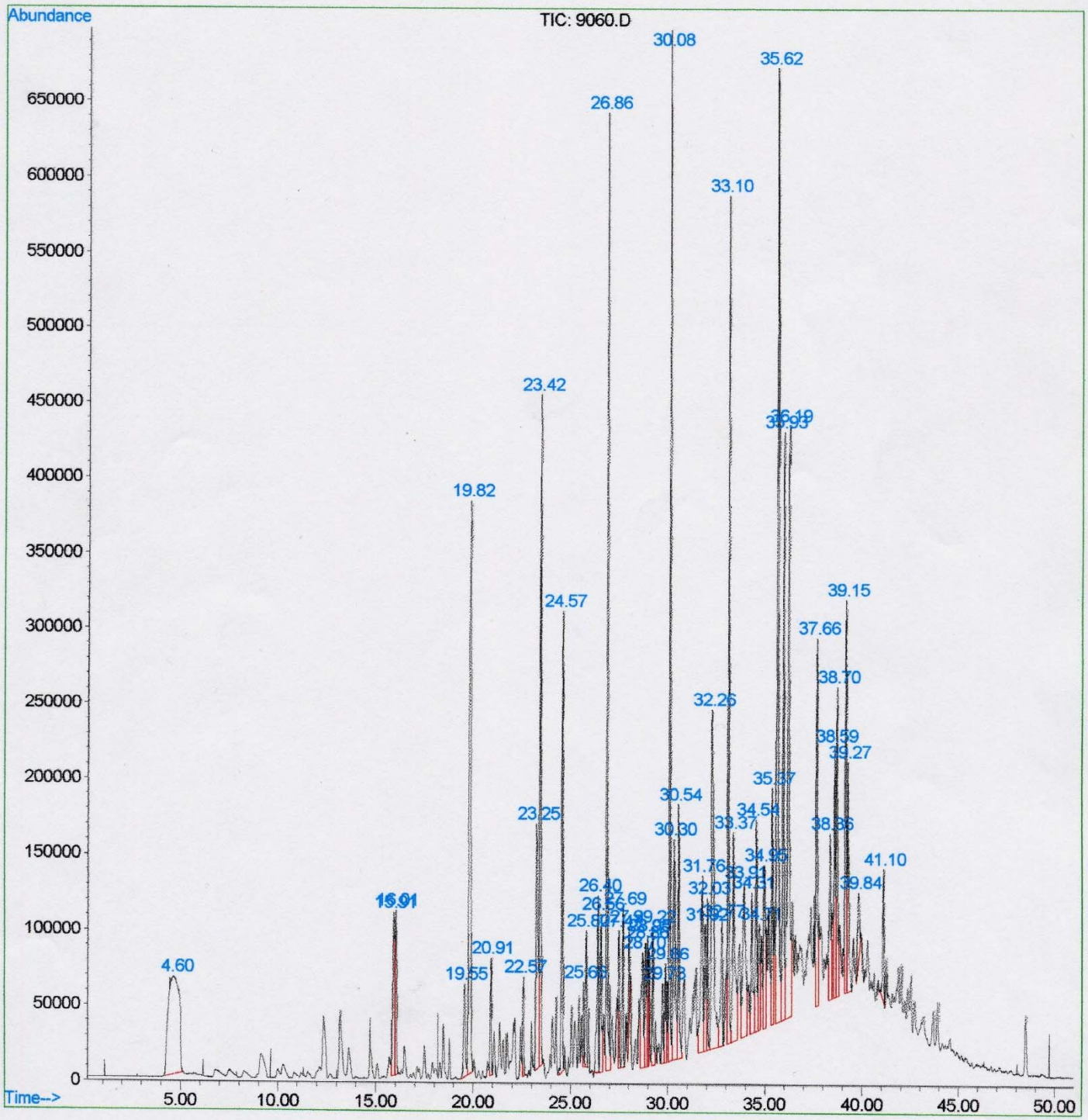
TIC: 9061.D: Cromatograma del análisis de la muestra 9061 (Tabla 3.1), por HRGC/MSD.

TIC: 8904.D: Cromatograma del análisis de la muestra 8904 (Tabla 3.1), por HRGC/MSD.

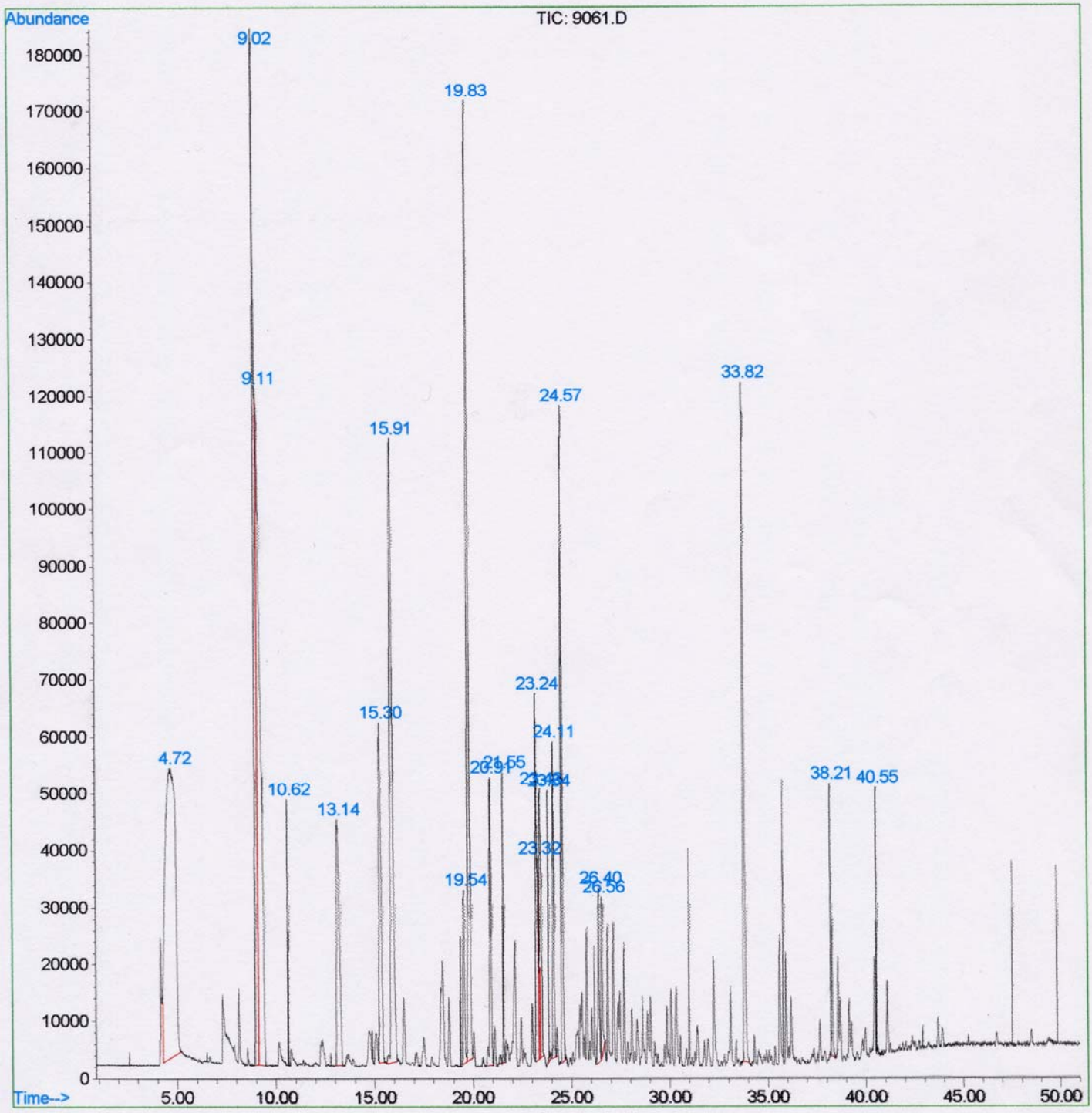
TIC: 8905.D: Cromatograma del análisis de la muestra 8905 (Tabla 3.1), por HRGC/MSD.

TIC: 8906A.D: Cromatograma del análisis de la muestra 8906 (Tabla 3.1), por HRGC/MSD.

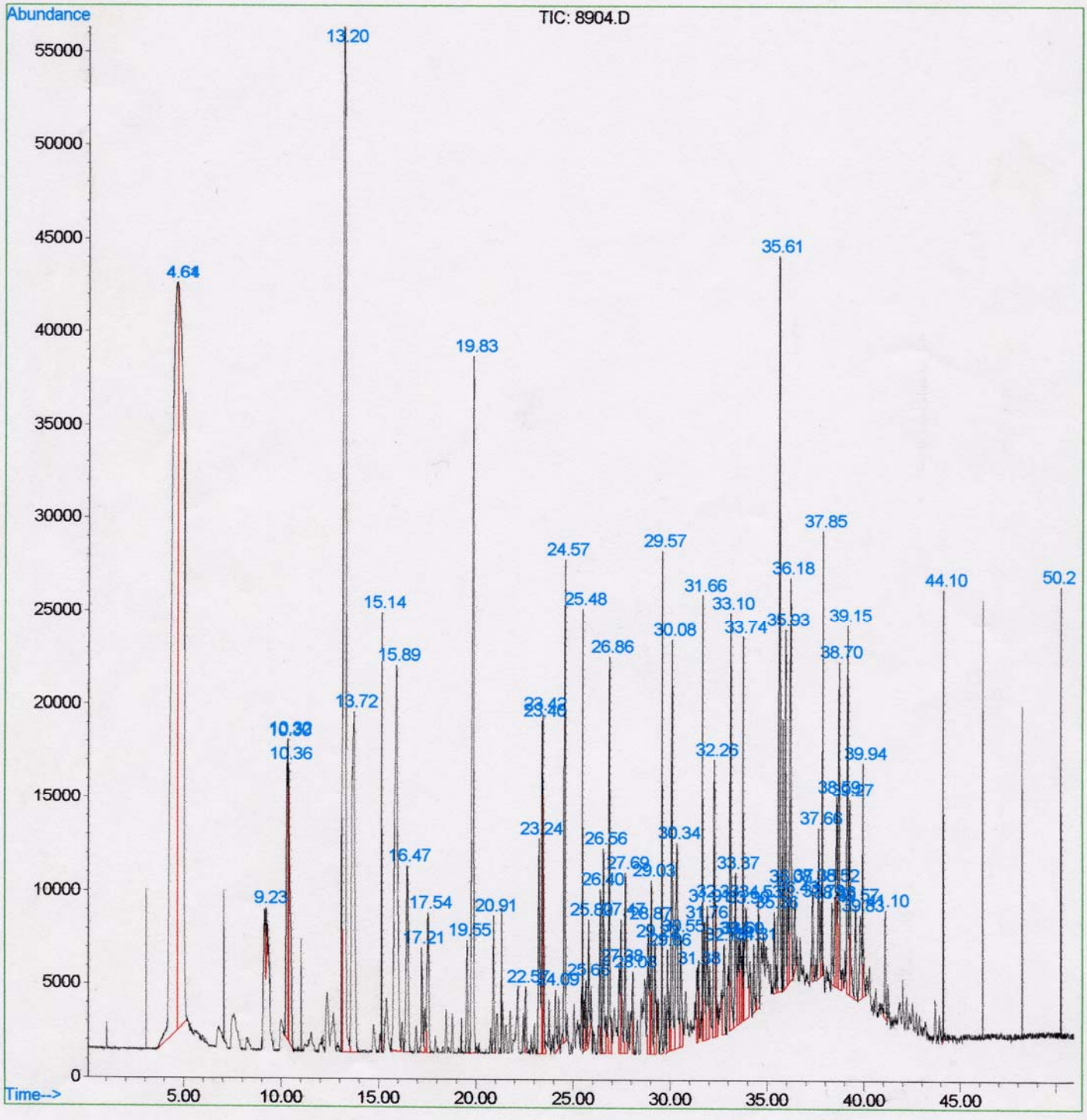
```
File       : C:\HPCHEM\1\DATA\SERVIC~1\9060.D
Operator   : Andrea R.
Acquired   :  6 Sep 2002  14:54     using AcqMethod VOC625-1
Instrument :   GC/MS Ins
Sample Name: 9060 VOCs asfalto 30.2g SPME/HS CAR/PDMS2
Misc Info  : 9060 VOCs asfalto 30.2g SPME/HS CAR/PDMS2
Vial Number: 1
```



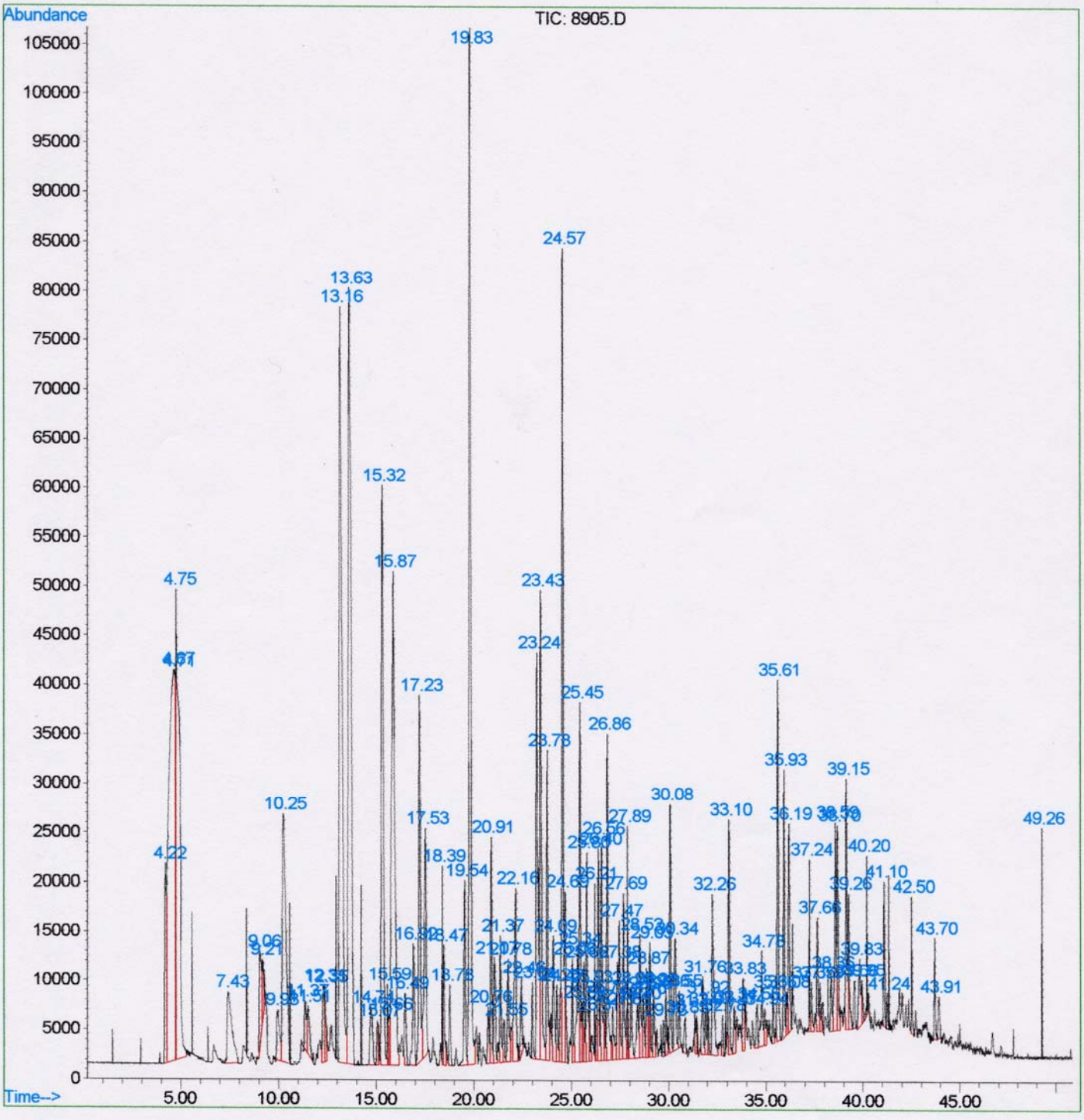
```
File       : C:\HPCHEM\1\DATA\ESTUDI~1\AHAS\20PPBMCA.D
Operator   : Carlos Campo
Acquired   :  7 Sep 2002  12:23     using AcqMethod AHASIM3
Instrument :   GC/MS Ins
Sample Name: 20PPB MCAA DER 400 RPM  50C rx 30C ex Cur Cal
Misc Info  : 20PPB MCAA DER 400 RPM  50C rx 30C ex Cur Cal
Vial Number: 1
```



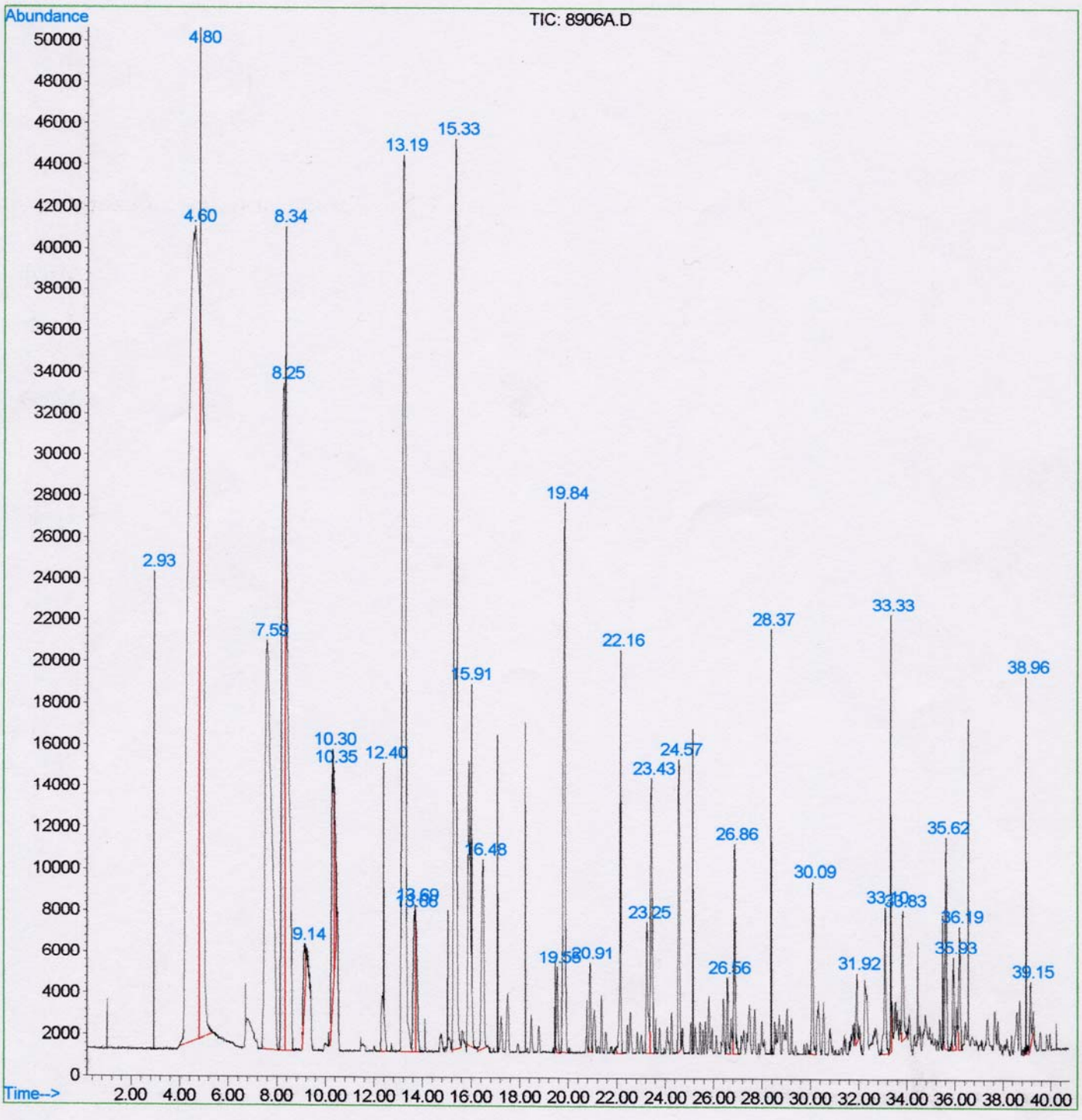
```
File        : C:\HPCHEM\1\DATA\SERVIC~1\8904.D
Operator    : Andrea R.
Acquired    : 27 Aug 2002  15:30     using AcqMethod VOC625-1
Instrument :   GC/MS Ins
Sample Name: 8904 vocs mtra 20 CIMOC SPME/HS
Misc Info   : 8904 vocs mtra 20 CIMOC SPME/HS
Vial Number: 1
```



```
File       : C:\HPCHEM\1\DATA\SERVIC~1\8905.D
Operator   : S. Estevez
Acquired   : 27 Aug 2002  16:34     using AcqMethod VOC625-1
Instrument :   GC/MS Ins
Sample Name: 8905 vocs Blanco frascos
Misc Info  : 8905 vocs blanco frascos
Vial Number: 1
```



```
File       : C:\HPCHEM\1\DATA\SERVIC~1\8906A.D
Operator   : Andrea R.
Acquired   : 28 Aug 2002  12:48     using AcqMethod VOC625-1
Instrument :   GC/MS Ins
Sample Name: 8906A VOCs SPME/HS mtra 22
Misc Info  : 8906A VOCs SPME/HS CAR/PDMS mtra 22
Vial Number: 1
```



ANEXO E. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EN Depav DE LAS DIFERENTES ESTRUCTURAS DE PAVIEMNTO

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	3.6600E-04 B	3.4262E+01 B	-2.6900E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-2.8700E-04 B	-2.2535E+01 B	3.0200E-04 A	2.9061E+00 B
					Ligada
2	7.00	-2.8700E-04 B	3.5486E-01 A	8.7000E-04 B	2.9061E+00 B
	27.00	-5.5100E-04 C	-1.8966E+00 C	6.2200E-04 C	7.1481E-01 C
					Ligada
3	27.00	-5.5100E-04 C	-2.2229E-01 C	1.0300E-03 C	7.1481E-01 C
	52.00	-4.3000E-04 C	-3.5486E-01 C	6.4700E-04 C	2.8348E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.3000E-04 C	-1.0095E-01 C	8.6900E-04 C	2.8348E-01 C
	77.00	-3.5100E-04 C	-1.2848E-01 C	6.0000E-04 C	1.5296E-01 C
					Ligada
5	77.00	-3.5100E-04 C	-2.3045E-02 C	8.3900E-04 C	1.5296E-01 C

Deflexión = 154.190 mm/100
Radio de Curvatura = 108.600 m

Figura D.1. Resultados Depav del diseño MDC-1 Convencional.

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	5.3000E-04 B	2.2739E+01 B	-3.3700E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-3.3700E-04 B	-1.0401E+01 A	4.4200E-04 A	3.9156E+00 B
					Ligada
2	7.00	-3.3700E-04 B	6.4037E-01 B	1.1500E-03 A	3.9156E+00 B
	27.00	-6.2200E-04 C	-2.0802E+00 C	6.8700E-04 B	8.0862E-01 B
					Ligada
3	27.00	-6.2200E-04 C	-2.3657E-01 C	1.1500E-03 B	8.0862E-01 B
	52.00	-4.6800E-04 C	-3.8035E-01 C	7.0200E-04 C	3.1407E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.6800E-04 C	-1.0605E-01 C	9.4700E-04 C	3.1407E-01 C
	77.00	-3.7600E-04 C	-1.3664E-01 C	6.4500E-04 C	1.6621E-01 C
					Ligada
5	77.00	-3.7600E-04 C	-2.3555E-02 C	9.0300E-04 C	1.6621E-01 C

Deflexión = 162.140 mm/100
Radio de Curvatura = 85.580 m

Figura D.2. Resultados Depav del diseño MDC-1 con 1% de GCR.

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	7.0000E-04 B	1.5397E+01 B	-3.1700E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-3.3500E-04 A	-3.4670E+00 A	-5.2000E-05 C	4.7518E+00 B
					Ligada
2	7.00	-3.3500E-04 A	1.1523E+00 B	1.3400E-03 A	4.7518E+00 B
	27.00	-6.6300E-04 C	-2.1414E+00 C	7.4400E-04 B	9.1467E-01 B
					Ligada
3	27.00	-6.6300E-04 C	-2.2535E-01 C	1.2700E-03 B	9.1467E-01 B
	52.00	-4.9900E-04 C	-3.9666E-01 C	7.5200E-04 C	3.4364E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.9900E-04 C	-1.0605E-01 C	1.0200E-03 C	3.4364E-01 C
	77.00	-4.0200E-04 C	-1.4378E-01 C	6.9300E-04 C	1.8049E-01 C
					Ligada
5	77.00	-4.0200E-04 C	-2.3147E-02 C	9.7400E-04 C	1.8049E-01 C

Deflexión = 169.410 mm/100
Radio de Curvatura = 74.370 m

Figura D.3. Resultados Depav del diseño MDC-1 con 2% de GCR.

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	4.3400E-04 B	2.8756E+01 B	-3.0400E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-3.1500E-04 B	-1.6519E+01 B	3.5900E-04 A	3.3446E+00 B
					Ligada
2	7.00	-3.1500E-04 B	4.4459E-01 A	9.9100E-04 A	3.3446E+00 B
	27.00	-5.8600E-04 C	-1.9884E+00 C	6.4900E-04 C	7.5662E-01 C
					Ligada
3	27.00	-5.8600E-04 C	-2.3147E-01 C	1.0800E-03 C	7.5662E-01 C
	52.00	-4.4800E-04 C	-3.6709E-01 C	6.7300E-04 C	2.9673E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.4800E-04 C	-1.0401E-01 C	9.0400E-04 C	2.9673E-01 C
	77.00	-3.6200E-04 C	-1.3256E-01 C	6.1900E-04 C	1.5805E-01 C
					Ligada
5	77.00	-3.6200E-04 C	-2.3453E-02 C	8.6600E-04 C	1.5805E-01 C

Deflexión = 157.760 mm/100
Radio de Curvatura = 96.660 m

Figura D.4. Resultados Depav del diseño MDC-2 Convencional.

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	5.0500E-04 B	2.4065E+01 B	-3.3100E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-3.3400E-04 B	-1.1625E+01 A	4.2100E-04 A	3.7729E+00 B
					Ligada
2	7.00	-3.3400E-04 B	5.8429E-01 B	1.1100E-03 A	3.7729E+00 B
	27.00	-6.1400E-04 C	-2.0598E+00 C	6.7700E-04 B	7.9231E-01 C
					Ligada
3	27.00	-6.1400E-04 C	-2.3555E-01 C	1.1300E-03 B	7.9231E-01 C
	52.00	-4.6300E-04 C	-3.7729E-01 C	6.9500E-04 C	3.0897E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.6300E-04 C	-1.0503E-01 C	9.3600E-04 C	3.0897E-01 C
	77.00	-3.7300E-04 C	-1.3562E-01 C	6.3800E-04 C	1.6417E-01 C
					Ligada
5	77.00	-3.7300E-04 C	-2.3555E-02 C	8.9400E-04 C	1.6417E-01 C

Deflexión = 161.060 mm/100
Radio de Curvatura = 87.950 m

Figura D.5. Resultados Depav del diseño MDC-2 con 1% de GCR.

#	Z (cm)	Epsilon T	Sigma T (Kg/cm²)	Epsilon Z	Sigma Z (Kg/cm²)
1	0.00	5.8700E-04 B	1.9884E+01 B	-3.4400E-04 B	6.6179E+00 A
	7.00	-3.3900E-04 B	-7.6376E+00 A	4.9500E-04 A	4.2216E+00 B
					Ligada
2	7.00	-3.3900E-04 B	7.8823E-01 B	1.2300E-03 A	4.2216E+00 B
	27.00	-6.3800E-04 C	-2.1108E+00 C	7.0800E-04 B	8.4431E-01 B
					Ligada
3	27.00	-6.3800E-04 C	-2.3453E-01 C	1.1900E-03 B	8.4431E-01 B
	52.00	-4.7900E-04 C	-3.8647E-01 C	7.1900E-04 C	3.2324E-01 C
					Ligada
4	52.00	-4.7900E-04 C	-1.0605E-01 C	9.7100E-04 C	3.2324E-01 C
	77.00	-3.8500E-04 C	-1.3868E-01 C	6.6000E-04 C	1.7029E-01 C
					Ligada
5	77.00	-3.8500E-04 C	-2.3453E-02 C	9.2600E-04 C	1.7029E-01 C

Deflexión = 164.590 mm/100
Radio de Curvatura = 80.930 m

Figura D.6. Resultados Depav del diseño MDC-2 con 2% de GCR.

ANEXO F. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PARA LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO

Mezcla densa en caliente MDC-2 Convencional.

Mezcla densa en caliente MDC-2 mejorada con 1% de GCR.

Mezcla densa en caliente MDC-2 mejorada con 2% de GCR.

MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC-2 CONVENCIONAL

I-EQUIPO

DESCRIPCION	MARCA	TIPO	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
PLANTA DE ASFALTO			$ 437,258.51 / h	40 m^3 / h	$ 10,931.46 / m^3	
CARGADOR	CASE	621B	$ 78,000.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,950.00 / m^3	
TERMINADORA ASFALTO			$ 42,900.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,072.50 / m^3	
COMPACTADOR		VIBRAT.	$ 37,078.60 / h	40 m^3 / h	$ 926.97 / m^3	
COMPACTADOR		NEUMAT.	$ 37,078.60 / h	40 m^3 / h	$ 926.97 / m^3	
					SUB-TOTAL	**15,807.89 / m^3**

II-MATERIALES

DESCRIPCION	COSTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	
GRAVA DE 5/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.34 m^3 / m^3	$ 8,430.72 / m^3	
GRAVILLA DE 3/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.42 m^3 / m^3	$ 10,376.28 / m^3	
ARENA DE RIO	$ 33,149.13 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 7,756.90 / m^3	
ARENA DE PEÑA	$ 15,656.77 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 3,663.68 / m^3	
FINOS DE TRITURACIÓN	$ 15,656.77 / m^3	0.08 m^3 / m^3	$ 1,221.23 / m^3	
ASFALTO SOLIDO	$ 550.84 / kg	176 kg / m^3	$ 96,786.99 / m^3	
ENERGIA	$ 139.04 / kW	4.48 kW / m^3	$ 622.88 / m^3	
COMBUSTIBLE	$ 1,300.00 / Gal	5.91 Gal / m^3	$ 7,683.00 / m^3	
DESPERDICIOS	$ 136,541.68 / m^3	0.05 m^3 / m^3	$ 6,827.08 / m^3	
			SUB-TOTAL	**$ 143,368.76 / m^3**

III-TRANSPORTE

DESCRIPCION	VOLUMEN	DISTANCIA	(M3 o Ton)Km	TARIFA	VALOR UNIT.	
VOLQUETA	6 m^3	30 km máx		$45,500.00 / viaje	$ 7,583.33 / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 7,583.33 / m^3**

IV-MANO DE OBRA

DESCRIPCION	JORNAL	PRESTACIO	JORNAL TOT.	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
1 INSPECTOR			$ 20,273.93 / día	40 m^3 / día	$ 506.85 / m^3	
1 TORNILLERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
2 RASTRILLEROS			$ 22,816.30 / día	40 m^3 / día	$ 570.41 / m^3	
1 MELACHERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
4 AYUDANTES			$ 24,632.40 / día	40 m^3 / día	$ 615.81 / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 2,263.47 / m^3**

TOTAL COSTO DIRECTO	**$ 169,023.46 / m^3**

V-COSTOS INDIRECTOS

DESCRIPCION	PORCENTAJE	VALOR TOTAL	
ADMINISTRACION, UTILIDADES E IMPREVISTOS	30%	$ 50,707.04 / m^3	
		SUB-TOTAL	**$ 50,707.04 / m^3**

PRECIO UNIT. TOTAL	**$ 219,730.50 / m^3**

MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC-2 MEJORADA CON 1% GCR

I-EQUIPO

DESCRIPCION	MARCA	TIPO	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
PLANTA DE ASFALTO			$ 437,258.51 / h	40 m^3 / h	$ 10,931.46 / m^3	
CARGADOR	CAT	930	$ 78,000.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,950.00 / m^3	
TERMINADORA ASFALTO			$ 42,900.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,072.50 / m^3	
COMPACTADOR		VIBRAT.	$ 37,078.60 / h	20 m^3 / h	$ 1,853.93 / m^3	
					$ - / m^3	
					SUB-TOTAL	**15,807.89 / m^3**

II-MATERIALES

DESCRIPCION	COSTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	
GRAVA DE 5/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.34 m^3 / m^3	$ 8,430.72 / m^3	
GRAVILLA DE 3/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.42 m^3 / m^3	$ 10,376.28 / m^3	
ARENA DE RIO	$ 33,149.13 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 7,756.90 / m^3	
ARENA DE PEÑA	$ 15,656.77 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 3,663.68 / m^3	
FINOS DE TRITURACIÓN	$ 15,656.77 / m^3	0.07 m^3 / m^3	$ 1,017.69 / m^3	
GCR Pasa tamiz 30	$ 986.00 / kg	26.30 kg / m^3	$ 25,931.33 / m^3	
ASFALTO SOLIDO	$ 550.84 / kg	204 kg / m^3	$ 112,397.80 / m^3	
ENERGIA	$ 139.04 / kW	4.48 kW / m^3	$ 622.88 / m^3	
COMBUSTIBLE	$ 1,300.00 / Gal	5.91 Gal / m^3	$ 7,683.00 / m^3	
DESPERDICIOS	$ 177,880.27 / m^3	0.05 m^3 / m^3	$ 8,894.01 / m^3	
			SUB-TOTAL	**$ 186,774.29 / m^3**

III-TRANSPORTE

DESCRIPCION	VOLUMEN	DISTANCIA	(M3 o Ton)Km	TARIFA	VALOR UNIT.	
VOLQUETA	6 m^3	30 km máx		$45,500.00 / viaje	$ 7,583.33 / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 7,583.33 / m^3**

IV-MANO DE OBRA

DESCRIPCION	JORNAL	PRESTACIO	JORNAL TOT.	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
2 INSPECTORES			$ 40,547.87 / día	40 m^3 / día	$ 1,013.70 / m^3	
1 TORNILLERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
2 RASTRILLEROS			$ 22,816.30 / día	40 m^3 / día	$ 570.41 / m^3	
1 MELACHERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
8 AYUDANTES			$ 49,264.80 / día	40 m^3 / día	$ 1,231.62 / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 3,386.13 / m^3**

TOTAL COSTO DIRECTO	**$ 213,551.65 / m^3**

V-COSTOS INDIRECTOS

DESCRIPCION	PORCENTAJE	VALOR TOTAL	
ADMINISTRACION, UTILIDADES E IMPREVISTOS	30%	$ 64,065.49 / m^3	
		SUB-TOTAL	**$ 64,065.49 / m^3**

PRECIO UNIT. TOTAL	**$ 277,617.14 / m^3**

MEZCLA DENSA EN CALIENTE EN PLANTA MDC-2 MEJORADA CON 2% DE GCR

I-EQUIPO

DESCRIPCION	MARCA	TIPO	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
PLANTA DE ASFALTO			$ 437,258.51 / h	40 m^3 / h	$ 10,931.46 / m^3	
CARGADOR	CAT	930	$ 78,000.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,950.00 / m^3	
TERMINADORA ASFALTO			$ 42,900.00 / h	40 m^3 / h	$ 1,072.50 / m^3	
COMPACTADOR		VIBRAT.	$ 37,078.60 / h	20 m^3 / h	$ 1,853.93 / m^3	
					$ - / m^3	
					SUB-TOTAL	**15,807.89 / m^3**

II-MATERIALES

DESCRIPCION	COSTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	
GRAVA DE 5/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.34 m^3 / m^3	$ 8,430.72 / m^3	
GRAVILLA DE 3/8"	$ 24,942.97 / m^3	0.42 m^3 / m^3	$ 10,376.28 / m^3	
ARENA DE RIO	$ 33,149.13 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 7,756.90 / m^3	
ARENA DE PEÑA	$ 15,656.77 / m^3	0.23 m^3 / m^3	$ 3,663.68 / m^3	
FINOS DE TRITURACIÓN	$ 15,656.77 / m^3	0.05 m^3 / m^3	$ 814.15 / m^3	
GCR Pasa tamiz 30	$ 986.00 / kg	52.60 kg / m^3	$ 51,862.65 / m^3	
ASFALTO SOLIDO	$ 550.84 / kg	204 kg / m^3	$ 112,397.80 / m^3	
ENERGIA	$ 139.04 / kW	4.48 kW / m^3	$ 622.88 / m^3	
COMBUSTIBLE	$ 1,300.00 / Gal	5.91 Gal / m^3	$ 7,683.00 / m^3	
DESPERDICIOS	$ 203,608.06 / m^3	0.05 m^3 / m^3	$ 10,180.40 / m^3	
			SUB-TOTAL	**$ 213,788.47 / m^3**

III-TRANSPORTE

DESCRIPCION	VOLUMEN	DISTANCIA	(M3 o Ton)Km	TARIFA	VALOR UNIT.	
VOLQUETA	6 m^3	30 km máx		$ 45,500.00 / viaje	$ 7,583.33 / m^3	
					$ - / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 7,583.33 / m^3**

IV-MANO DE OBRA

DESCRIPCION	JORNAL	PRESTACIO	JORNAL TOT.	RENDIMIENTO	VALOR UNIT.	
2 INSPECTORES			$ 40,547.87 / día	40 m^3 / día	$ 1,013.70 / m^3	
1 TORNILLERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
2 RASTRILLERO			$ 22,816.30 / día	40 m^3 / día	$ 570.41 / m^3	
1 MELACHERO			$ 11,408.15 / día	40 m^3 / día	$ 285.20 / m^3	
8 AYUDANTES			$ 49,264.80 / día	40 m^3 / día	$ 1,231.62 / m^3	
					SUB-TOTAL	**$ 3,386.13 / m^3**

TOTAL COSTO DIRECTO	**$ 240,565.82 / m^3**

V-COSTOS INDIRECTOS

DESCRIPCION	PORCENTAJE	VALOR TOTAL	
ADMINISTRACION, UTILIDADES E IMPREVISTOS	30%	$ 72,169.75 / m^3	
		SUB-TOTAL	**$ 72,169.75 / m^3**

PRECIO UNIT. TOTAL	**$ 312,735.57 / m^3**

ANEXO G. ESPECIFICACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL GCR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

ESPECIFICACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL GCR EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE

1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO 1

1.1 NOMENCLATURA DE VARIABLES Y DE MATERIALES 1

1.1.1 Nomenclatura de variables 1

1.1.2 Nomenclatura de materiales 2

1.2 NORMAS 2

1.2.1 Normas INVIAS 2

1.2.2 Normas AASHTO 2

1.2.3 Normas ASTM 3

1.2.4 Normas AFNOR 3

1.3 DEFINICIONES 3

1.4 INTRODUCCIÓN 4

1.5 ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES 4

1.5.1 Para el GCR. 4

1.5.2 Para el cemento asfáltico a ser modificado. 4

1.5.3 Para los granulares. 5

1.6 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO MODIFICADO CON GCR (AC) 6

1.7 MEZCLA ASFÁLTICA 8

1.7.1 Contenido óptimo de ligante. 8

1.7.2 Propiedades de la Mezcla asfáltica. 8

1.8 EQUIPO DE FABRICACIÓN 9

1.9 SUMINISTRO, EXTENSIÓN Y COMPACTACIÓN 10

2 MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO 11

2.1 NOMENCLATURA DE VARIABLES Y DE MATERIALES 11

2.1.1 Nomenclatura de variables 11

2.1.2 Nomenclatura de materiales 11

2.2 NORMAS 12

2.2.1 Normas INVIAS 12

2.2.2 Normas AASHTO 12

2.2.3 Normas ASTM 12

2.2.4 Normas AFNOR 13

2.3 DEFINICIONES 13

2.4 INTRODUCCIÓN 14

2.5 ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES 14

2.5.1 Para el GCR. 14

2.5.2 Para el cemento asfáltico. 14

2.5.3 Para los granulares. 14

2.6 MEZCLA ASFÁLTICA 15

2.6.1 Contenido de GCR. 15

2.6.2 Contenido óptimo de ligante. 16

2.6.3 Propiedades de la Mezcla asfáltica. 16

2.7 EQUIPO DE FABRICACIÓN 17

2.8 SUMINISTRO, EXTENSIÓN Y COMPACTACIÓN 17

1 MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTO MODIFICADO CON CAUCHO

1.1 NOMENCLATURA DE VARIABLES Y DE MATERIALES

1.1.1 Nomenclatura de variables

a	:	Categoría de las arenas, Tabla D.3-5 RSV 2002.
A	:	Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
B	:	Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
BA	:	Punto de ablandamiento.
C	:	Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
D	:	Mayor dimensión especificada de un material granular.
II	:	Categoría de gravillas y gravas según característica de fabricación, Tabla D.3-3 RSV 2002.
It	:	Índice de trituración: la proporción en peso de elementos superiores al diámetro **D** del material granular tratado, contenido en el material de origen sometido a triturado; en el caso de recomposición, es la medida ponderada de los índices de trituración de los diferentes componentes.
Rc	:	Relación de trituración: es la relación entre la dimensión mas pequeña del material sometido a la primera trituración y el **D** del granular obtenido.
r/R	:	Relación inmersión-compresión.
RTFOT	:	Siglas que en inglés significa Rolling Thing Film Oven Test, y hace referencia al ensayo de película delgada en horno rotatorio.

1.1.2 Nomenclatura de materiales

AC : Asfalto modificado con GCR.
CA : Mezcla asfáltica para capa de rodadura.
GCR : Grano de caucho reciclado.

1.2 NORMAS

1.2.1 Normas INVIAS

INV E-702	Ductilidad de materiales asfálticos.
INV E-706	Penetración de materiales asfálticos.
INV E-712	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).
INV E-713	Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno.
INV E-715	Viscosidad cinemática de asfaltos.
INV E-716	Viscosidad del asfalto con el método del viscosímetro capilar de vacío.
INV E-720	Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.
INV E-724	Índice de penetración de cementos asfálticos.
INV E-747	Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.
INV E-748	Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.
INV E-754	Módulo dinámico de mezclas asfálticas.
INV E-756	Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio.

1.2.2 Normas AASHTO

T-301-95	Elastic recovery test of bituminous materials by means of a ductilometer.

1.2.3 Normas ASTM

D 4402-87 Standard test meted for viscosity determinations of unfilled asphalts using the Brookfield thermosel apparatus.

1.2.4 Normas AFNOR

NF P 98-261 Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés.

1.3 DEFINICIONES

- **Asfaltos puros:** son los obtenidos por refinación de crudo de petróleo y que no tienen ningún aditivo.
- **Asfaltos modificados:** son los asfaltos mezclados con sustancias macromoleculares diferentes a minerales finos o aditivos de adhesividad.
- **Caucho modificador:** Conocido como GCR, Grano de Caucho Reciclado, es el caucho molido proveniente de llantas desechadas usado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en otras aplicaciones de pavimentación.
- **Compacidad:** se define como compacidad **C** a la relación entre el volumen real del granular más el ligante con respecto al volumen aparente de la mezcla:

$$\mathbf{C} = \frac{\text{Volumen real del granular} + \text{Volumen real del ligante}}{\text{Volumen aparente de la mezcla asfáltica}} \times 100\%$$

- **Mezcla asfáltica:** Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.

- **Proceso húmedo:** El proceso húmedo es cualquier método en el cual se mezclan las partículas de caucho con el cemento asfáltico antes de adicionar la mezcla resultante a los agregados.

1.4 INTRODUCCIÓN

El empleo del GCR en las mezclas asfálticas en caliente produce resultados de buena calidad, si se parte de materiales bien estudiados y métodos de diseño y construcción correctos.

La utilización de GCR por el proceso húmedo proporciona un asfalto modificado que puede ser empleado como se ha especificado para este tipo de producto.

1.5 ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES

1.5.1 Para el GCR. El GCR será el producto del raspado de la huella de llantas de camión ó vehículos ligeros en el proceso de reencauche. El GCR deberá ser uniforme, libre de metal, fibras textiles u otros contaminantes, y deberá estar seco. Todo el GCR tendrá un tamaño inferior a 595 μm (pasante del tamiz No. 30). Una vez se tenga el material en el sitio de trabajo, este debe ser almacenado en la tolva para su disposición.

1.5.2 Para el cemento asfáltico a ser modificado. Los cementos asfálticos a ser modificados con GCR deberán ser asfaltos puros, y deberán cumplir con las característica mínimas que se indican en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1. Especificación de asfaltos puros.

Característica	Unidad	Norma de ensayo	Tipo I		Tipo II	
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
ASFALTO PURO						
Penetración a 25°C	0.1 mm	INV E-706	60	70	80	100
Viscosidad a 60°C	P	INV E-716	1000	2000	700	1300
Viscosidad a 135°C	cSt	INV E-715	250		200	
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712	47		49	
Ductilidad (10°C asfaltos 80 – 100) (13°C asfaltos 60 – 70)	cm	INV E-702	 - 100		 100 -	
Solubilidad en tricloroetileno	%	INV E-713	99	-	99	-
PRUEBAS AL ENVEJECIDO						
Pérdida de masa	%	INV E-720 INV E-721	-	1.0	-	1.0
Penetración residual (% de la penetración original)	0.1 mm	INV E-706	52	-	48	-
Incremento del punto de ablandamiento	°C	INV E-712		9		9

1.5.3 Para los granulares. Los granulares para la elaboración de las mezclas asfálticas para capas de rodadura y liga deben cumplir las especificaciones establecidas para capas de liga en el Cuadro 1.2, y para capas de rodadura en el Cuadro 1.3, en relación a las características intrínsecas y de fabricación dadas en el capítulo D.3 del RSV 2002.

Cuadro 1.2. Especificaciones para granulares de mezclas asfálticas para capas de liga (CAL)

Tránsito de diseño	< T1	T2	T3	T4	≥T5
Características normalizadas					
Dureza de la fracción gruesa	C		B		
Granulometría de la fracción gruesa(1)	II		II		
Granulometría y limpieza de arenas	a		a		
Características complementarias					
Angularidad de la fracción gruesa(2)	It≥30		It=100		Rc≥2

Nota:

1. En algunos casos, para mejorar la manejabilidad y compacidad de las mezclas asfálticas para capas de rodadura (CA), se podrá adicionar arena (máximo 20%).
2. Ver literal D.3.7.

Cuadro 1.3. Especificación para granulares de mezclas asfálticas para capas de rodadura (CA).

Tránsito de diseño	< T1	T2	T3	T4	≥T5
Características normalizadas					
Dureza de la fracción gruesa	B	A			
Granulometría de la fracción gruesa(1)	II	II			
Granulometría y limpieza de arenas	a	a			
Características complementarias(2)					
Angularidad de la fracción gruesa(1)	It≥60	Rc≥2		Rc≥4	
Rango de tolerancia granulométrica para la fracción gruesa	Clase granular	El % que pasa el diámetro en mm de	Debe estar comprendido entre		
	4-6.3	5	30 y 55%		
	6.3-10	8	37 y 62%		
	6.3-14	10	45 y 70%		
	10-14	12.5	52 y 77%		

Nota:

1. En algunos casos, para mejorar la manejabilidad y compacidad de las mezclas asfálticas para capas de rodadura (CA), se podrá adicionar arena (máximo 20%).
2. Ver literal D.3.7.

La granulometría de los agregados podrá ser cualquiera de las establecidas para mezclas asfálticas en caliente en el aparte F.2.6.1.1 del RSV 2002.

1.6 PRODUCCIÓN DEL ASFALTO MODIFICADO CON GCR (AC)

La modificación del ligante puro con GCR deberá hacerse en un equipo que esté en la capacidad de proporcionar una mezcla asfalto-caucho homogénea, controlándose las variables presentadas en el Cuadro 1.4. El asfalto modificado con GCR deberá cumplir con las propiedades mínimas especificadas en el Cuadro 1.6.

Si al menos una de las propiedades especificadas en el Cuadro 1.6 no se llega a cumplir, se deberá calcular el porcentaje óptimo de GCR para modificar un ligante puro, mediante un

programa experimental siguiendo las recomendaciones señaladas en el Cuadro 1.5 y cumpliendo con las propiedades especificadas en el Cuadro 1.6.

Cuadro 1.4. Valores típicos recomendados para modificar el ligante con GCR.

Variables	Unidad	Ligante Asfáltico	
		Tipo I	Tipo II
Cantidad de GCR	%	13 ± 0.5	15 ± 0.5
Temperatura de mezclado	°C	165 ± 1	155 ± 1
Tiempo mínimo de reacción	min	55	50

Cuadro 1.5. Intervalo de valores característicos recomendados para modificar el ligante con GCR.

Característica	Unidad	Mín.	Máx.
Cantidad de GCR	%	10	20
Tiempo de reacción	min	45	240
Velocidad de agitación	rpm	20	750

Cuadro 1.6. Especificación de asfaltos modificados con GCR.

Característica	Unidad	Norma de ensayo	Mín.	Máx.
Viscosidad Brookfield a 163°C	P	ASTM D 4402-87	15	30
Penetración a 25°C	0.1 mm	INV E-706	40	60
Punto de ablandamiento	°C	INV E-712	55	-
PRUEBAS AL RESIDUO DESPUÉS DEL RTFOT				
Pérdida de masa	%	INV E-720	1.0	-
Penetración, % de la penetración original	%	INV E-706	65	-
Recuperación elástica	%	AASHTO T-301-95	50	-

Si la mezcla asfalto caucho no es usada dentro de las primeras cuatro horas después del tiempo de reacción, y se mantiene almacenada a una temperatura por encima de 155°C, el calentamiento del material debe ser suspendido. Si la mezcla asfalto-caucho llega a enfriarse por debajo de 155°C y es nuevamente calentada, esto se debe considerar como un ciclo de calentamiento. El número total de ciclos de calentamiento no debe ser mayor de

dos. Mientras la mezcla asfalto-caucho se mantenga almacenada a altas temperaturas se debe mantener en agitación constante para evitar separación del GCR y el cemento asfáltico, previendo que no se presenten zonas dentro del tanque donde el producto no se encuentre en agitación constante.

1.7 MEZCLA ASFÁLTICA

La elaboración de la mezcla asfáltica con un asfalto modificado con GCR será igual a la estipulada para un asfalto modificado con polímeros. La temperatura de mezclado de los agregados y el asfalto-caucho será la que indique la curva reológica del asfalto modificado con GCR.

1.7.1 Contenido óptimo de ligante. El contenido óptimo de cemento asfáltico modificado con caucho se determinará mediante la elaboración en compactación giratoria de probetas de mezcla asfáltica con diferentes contenidos de ligante, Norma IDU-300, evaluándose la Compacidad y el módulo dinámico de las mismas; por lo tanto, el contenido óptimo de ligante será aquel que cumpla con los parámetros de Módulo y Compacidad especificados en el Cuadro 1.7.

1.7.2 Propiedades de la Mezcla asfáltica. Las Propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con GCR son las que se establecen en el Cuadro 1.7. Los ensayos en la prensa de compactación giratoria permiten prever con una buena precisión la compacidad que se obtendrá en obra, con base en la compacidad obtenida en un número de giros igual a diez veces el espesor de aplicación expresado en centímetros (norma IDU-300).

Cuadro 1.7. Propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas elaboradas con asfalto modificado con GCR.

Ensayo	Norma	Valores admisibles
Ensayo de compactación giratoria - Compacidad en 10 giros (**C**10) - Compacidad en 80 giros (**C**80)	IDU – 300	 < 89% 93 – 96 %
Ensayo Marshall - compacidad	INV E – 748	≤ 97 %
Ensayo de compresión simple a 18°C y 1 mm/s	INV E – 747	> 6 MPa
Resistencia conservada, luego de inmersión	INV E – 738	> 75 %
Ensayo de ahuellamiento: Máxima velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 min.	INV E – 756	20 μm/min
Módulo a 15°C y 10 Hz	INV E – 754	> 4600 MPa
Fatiga ε_6 a 15°C y 25 Hz	NF P 98-261	≥ $180x10^{-6}$

1.8 EQUIPO DE FABRICACIÓN

Para la producción de asfalto-caucho se deberá contar con el siguiente equipo:

- Una tolva para el almacenamiento del GCR debidamente acondicionada para conservarlo libre de humedad y contaminates nocivos.
- Un tanque de reacción capaz de alcanzar y mantener la temperatura requerida para la reacción del cemento asfáltico y el GCR. El sistema de mezclado deberá ser capaz de variar la velocidad de agitación, y garantizará la homogeneidad de la mezcla asfalto-caucho en todo el tanque evitando zonas donde el material no esté en agitación constante. Los alimentadores del cemento asfáltico y del GCR deberán estar equipados con sistemas que garanticen la proporción adecuada, en peso, de cada material en el tiempo indicado. Así mismo deberá contar con un dispositivo especial que permita tomar muestras de la mezcla asfalto-caucho en la parte superior y fondo del tanque.
- Un tanque de almacenamiento capaz de mantener la mezcla asfalto-caucho en agitación constante a la temperatura de almacenamiento establecida. Esta unidad deberá estar equipada con un equipo de control y registro de temperatura.

- La planta para la elaboración de la mezcla asfáltica con un asfalto modificado con GCR deberá estar equipada con tuberías y bombas adecuadas para trabajar con un asfalto modificado; además deberá cumplir con lo especificado en el Capítulo F.3 del RSV 2002.

1.9 SUMINISTRO, EXTENSIÓN Y COMPACTACIÓN

El suministro, extensión y compactación será igual a lo determinado para mezclas asfálticas en caliente en el Capítulo F.4 del RSV 2002.

2 MEZCLAS ASFÁLTICAS MEJORADAS CON CAUCHO

2.1 NOMENCLATURA DE VARIABLES Y DE MATERIALES

2.1.1 Nomenclatura de variables

a : Categoría de las arenas, Tabla D.3-5 RSV 2002.
A : Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
B : Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
BA : Punto de ablandamiento.
C : Categoría de gravillas y gravas según característica intrínseca, Tabla D.3-2 RSV 2002.
D : Mayor dimensión especificada de un material granular.
II : Categoría de gravillas y gravas según característica de fabricación, Tabla D.3-3 RSV 2002.
It : Índice de trituración: la proporción en peso de elementos superiores al diámetro **D** del material granular tratado, contenido en el material de origen sometido a triturado; en el caso de recomposición, es la medida ponderada de los índices de trituración de los diferentes componentes.
Rc : Relación de trituración: es la relación entre la dimensión mas pequeña del material sometido a la primera trituración y el **D** del granular obtenido.
r/R : Relación inmersión-compresión.
RTFOT : Siglas que en inglés significa Rolling Thing Film Oven Test, y hace referencia al ensayo de película delgada en horno rotatorio.

2.1.2 Nomenclatura de materiales

CA : Mezcla asfáltica para capa de rodadura.
GCR : Grano de caucho reciclado.
RAP : Recycled Asphalt Pavement.

2.2 NORMAS

2.2.1 Normas INVIAS

INV E-702	Ductilidad de materiales asfálticos.
INV E-706	Penetración de materiales asfálticos.
INV E-712	Punto de ablandamiento de materiales bituminosos (aparato de anillo y bola).
INV E-713	Solubilidad de materiales asfálticos en tricloroetileno.
INV E-715	Viscosidad cinemática de asfaltos.
INV E-716	Viscosidad del asfalto con el método del viscosímetro capilar de vacío.
INV E-720	Ensayo al horno de lámina asfáltica delgada en movimiento.
INV E-724	Índice de penetración de cementos asfálticos.
INV E-747	Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas.
INV E-748	Resistencia de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall.
INV E-754	Módulo dinámico de mezclas asfálticas.
INV E-756	Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio.

2.2.2 Normas AASHTO

T-301-95	Elastic recovery test of bituminous materials by means of a ductilometer.

2.2.3 Normas ASTM

D 4402-87	Standard test meted for viscosity determinations of unfilled asphalts using the Brookfield thermosel apparatus.

2.2.4 Normas AFNOR

NF P 98-261 Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés.

2.3 DEFINICIONES

- **Asfaltos puros:** son los obtenidos por refinación de petróleos crudos y que no tienen ningún aditivo.
- **Caucho modificador:** Conocido como GCR, Grano de Caucho Reciclado, es el caucho molido proveniente de llantas desechadas usado en la fabricación de mezclas asfálticas en caliente y en otras aplicaciones de pavimentación.
- **Compacidad:** se define como compacidad **C** a la relación entre el volumen real del granular más el ligante con respecto al volumen aparente de la mezcla:

$$\mathbf{C} = \frac{\text{Volumen real del granular} + \text{Volumen real del ligante}}{\text{Volumen aparente de la mezcla asfáltica}} \times 100\%$$

- **Mezcla asfáltica:** Es la combinación de agregados y cemento asfáltico, la cual es usada como un material de pavimentación.
- **Mezcla asfáltica mejorada con caucho:** Es la combinación de agregados, cemento asfáltico y grano de caucho reciclado, la cual es usada como un material de pavimentación.
- **Proceso seco:** En el proceso seco se mezcla el caucho con los agregado pétreos antes de adicionar el cemento asfáltico.

2.4 INTRODUCCIÓN

El empleo del GCR en las mezclas asfálticas en caliente produce resultados de buena calidad, si se parte de materiales bien estudiados y métodos de diseño y construcción correctos.

Con la utilización de GCR mediante el proceso seco se obtiene una mezcla asfáltica mejorada, conservando los husos granulométricos establecidos para mezclas asfálticas en caliente.

2.5 ESPECIFICACIONES PARA LOS MATERIALES

2.5.1 Para el GCR. El GCR será el producto del raspado de la huella de llantas de camión ó vehículos ligeros en el proceso de reencauche. El GCR deberá ser uniforme, libre de metal, fibras textiles u otros contaminates, y deberá estar relativamente seco. Todo el GCR tendrá un tamaño inferior a 595 μm (pasante del tamiz No. 30). Una vez se tenga el material en el sitio de trabajo, este debe ser almacenado en la tolva para su disposición.

2.5.2 Para el cemento asfáltico. Los cementos asfálticos a ser mezclados con GCR y agregados para conformar la mezcla asfáltica deberán ser asfaltos puros, y deberán cumplir con las característica mínimas que se indican en el Cuadro 1.1.

2.5.3 Para los granulares. Los granulares para mezclas asfálticas para capas de rodadura y liga deben cumplir las especificaciones establecidas para capas de rodadura en

el Cuadro 1.3, y para capas de liga en el Cuadro 1.2, en relación a las características intrínsecas y de fabricación dadas en el capítulo D.3 del RSV 2002.

La granulometría de los agregados podrá ser cualquiera de las establecidas para mezclas asfálticas en caliente en el aparte F.2.6.1.1 del RSV 2002.

2.6 MEZCLA ASFÁLTICA

La elaboración de la mezcla asfáltica será igual a lo especificado para mezclas asfálticas en caliente en el Capítulo F.4 del RSV 2002.

El GCR deberá ser premezclado con los agregados finos antes de iniciar el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica. La premezcla de agregados finos y GCR deberá ser homogénea y con la dosificación exacta de GCR. En el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, la premezcla de agregados finos y GCR deberá ser introducida al tambor de mezclado con la precaución de que el GCR no sea alcanzado por la llama del quemador; si la planta asfáltica cuenta con el acceso de Concreto Asfáltico Reciclado (RAP), la mezcla agregados-GCR deberá ser introducida por este acceso.

La temperatura de mezclado será la que indique la curva reológica del asfalto puro, y estará relacionada con el tipo de granulometría a utilizar.

2.6.1 Contenido de GCR. El aporte de GCR para elaborar la mezcla asfáltica mejorada con caucho será de 1% del peso total de los agregados, el cual se incorporará a la mezcla asfáltica remplazando en peso los agregados finos, en la misma cantidad y tamaño.

2.6.2 Contenido óptimo de ligante. El contenido óptimo de cemento asfáltico se determinará mediante la elaboración en compactación giratoria de probetas de mezcla asfáltica con diferentes contenidos de ligante, Norma IDU-300, evaluándose la Compacidad y el módulo dinámico de las mismas; por lo tanto, el contenido óptimo de ligante será aquel que cumpla con los parámetros de Módulo y Compacidad especificados en el Cuadro 2.1.

Para la elaboración de las probetas de mezcla asfáltica mejorada con GCR en el equipo de compactación giratoria se deberán seguir las recomendaciones para esto que se describen en el numeral 2.6.3 de estas especificaciones.

2.6.3 Propiedades de la Mezcla asfáltica. Las propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas se establecen en el Cuadro 2.1. Los ensayos en la prensa de compactación giratoria permiten prever con una buena precisión la compacidad que se obtendrá en obra, con base en la compacidad obtenida en un número de giros igual a diez veces el espesor de aplicación expresado en centímetros (norma IDU-300).

Cuadro 2.1. Propiedades mínimas requeridas para mezclas asfálticas mejoradas con caucho para capa de rodadura o liga.

Ensayo	Norma	Valores admisibles
Ensayo de Compactación giratoria - Compacidad en 10 giros (**C**10) - Compacidad en 80 giros (**C**80)	IDU – 300	 < 89% 93 – 96 %
Ensayo Marshall - compacidad	INV E – 748	≤ 97 %
Ensayo de compresión simple a 18°C y 1 mm/s	INV E – 747	> 6 MPa
Resistencia conservada, luego de inmersión	INV E – 738	> 75 %
Ensayo de ahuellamiento: Máxima velocidad de deformación en el intervalo de 105 a 120 min.	INV E – 756	20 μm/min
Módulo a 15°C y 10 Hz	INV E – 754	> 4600 MPa
Fatiga ε_6 a 15°C y 25 Hz	NF P 98-261	$\geq 100x10^{-6}$

Para la elaboración de probetas de mezcla asfáltica mejorada con GCR, en el equipo de compactación giratoria, se deberá colocar una sobrecarga uniformemente distribuida sobre la cara superior inmediatamente después de compactada la mezcla asfáltica y sin haber extraído la probeta del molde. La cara inferior deberá estar apoyada en toda su área sobre una superficie plana y horizontal. La probeta deberá reposar por un período de 24 horas en las condiciones anteriormente descritas, seguido a lo anterior se retirará la sobrecarga y se extraerá la probeta del molde para su posterior evaluación. La sobrecarga será de 5 kg ó 16 kg si el molde empleado fuese de 4 pulg. ó 6 pulg. de diámetro respectivamente.

2.7 EQUIPO DE FABRICACIÓN

Las mezclas asfálticas mejoradas con GCR sólo se podrán fabricar en plantas continuas que tengan entrada de RAP ó cualquier entrada de materia prima ubicada en el espacio medio entre la entrada de los agregados y la entrada del ligante, con el objeto de adicionar por este acceso la premezcla de agregados finos y GCR para que se alcancen a mezclar con los demás agregados antes de la adición del ligante, y para que el GCR no entre en contacto con la llama del quemador. Adicionalmente deberá cumplir con lo especificado en el Capítulo F.3 del RSV 2002.

2.8 SUMINISTRO, EXTENSIÓN Y COMPACTACIÓN

El suministro y extensión será igual a lo determinado en el Capítulo F.4 del RSV 2002. La compactación deberá comenzar, una vez extendida la mezcla, a la temperatura más alta posible con que ella pueda soportar la carga a que se somete sin que se produzcan agrietamientos o desplazamientos indebidos. No se podrá usar compactador de neumático, esto con el fin de evitar que el GCR se adhiera al rodillo, y deberá compactarse constantemente hasta que la temperatura en la mezcla asfáltica llegue a los 60°C, para evitar la recuperación del GCR.