INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO

INFORME FINAL CONVENIO 1819 / 2014

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE DESEMPEÑO DE MATERIALES DE INFRAESTRUCTURA VIAL A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIONES

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

BOGOTÁ, NOVIEMBRE 25 DE 2015

Contenido

1. Preliminares 1
2. Introducción y objetivos del convenio 3
3. Estado del arte 5
3.1 Fibras de Poliéster 14
3.2 Fibras de Polipropileno 19
3.4 Fibras de múltiples compuestos empleadas en pavimentos flexibles y rígidos ... 27
4. Descripción de actividades 33
4.1 Metodología Experimental 33
4.2 Programa experimental: 34
4.3 Conformación Comité Operativo: 34
4.4 Consecución de los materiales 34
4.5 Caracterización de los materiales: 35
4.5.1 Especificaciones técnicas fibras 35
4.5.2 Asfalto: 38
4.5.2.1 Punto de Ablandamiento (Ensayo anillo y bola) 38
4.5.2.2 Penetración 39
4.5.2.3 Punto de llama e ignición 40
4.5.2.4 Ductilidad 40
4.5.2.5 Viscosidad del asfalto 41
4.5.2.6 Ensayos en el Reómetro de corte dinámico del asfalto 41
4.5.3 Agregado pétreo para mezclas asfálticas: 44
4.5.3.1 Granulometría 44
4.5.4 Cemento hidráulico: 46
4.5.4.1 Densidad del cemento 46
4.5.4.2 Finura del cemento 46
4.5.4.3 Masa unitaria del cemento 48
4.5.4.4 Consistencia y tiempo fraguado cemento 48
4.5.5 Agregado pétreo para mezclas de concreto: 50
4.5.5.1 Agregado Grueso y fino 50
4.6 Diseño mezclas de concreto hidráulico: 51

4.7 Diseño mezclas asfálticas 60
5. Resultados ensayos mecánicos de mezclas de concreto con y sin adición de fibras ... 64
6. Resultados ensayos mecánicos y dinámicos de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras 68
7. Análisis de resultados 72
7.1 Caracterización del ligante asfáltico 72
7.2 Caracterización del cemento portland 72
7.3 Agregado pétreo para mezclas asfálticas en caliente 73
7.4 Agregado pétreo para concreto hidráulico 73
7.5 Diseño Mezclas asfálticas granulometría MD12 73
7.5.1 Estabilidad 73
7.5.1.1 Estabilidad Fibras 1 73
7.5.1.2 Estabilidad Fibras 2 74
7.5.1.3 Estabilidad Fibras 3 75
7.5.2 Flujo 76
7.5.2.1 Flujo Fibra 1 76
7.5.2.2 Flujo Fibra 2 76
7.5.2.3 Flujo Fibra 3 77
7.5.3 Densidad Bulk 77
7.5.3.1 Densidad Bulk Fibra 1 78
7.5.3.2 Densidad Bulk Fibra 2 78
7.5.3.3 Densidad Bulk Fibra 3 79
7.5.4 Vacíos 80
7.5.4.1 Vacíos Fibra 1 80
7.5.4.2 Vacíos Fibra 2 80
7.5.4.3 Vacíos Fibra 3 81
7.6 Diseño Mezclas asfálticas granulometría MS25 82
7.6.1 Estabilidad 83
7.6.1.1 Estabilidad Fibras 1 83
7.6.1.2 Estabilidad Fibras 2 83
7.6.1.3 Estabilidad Fibras 3 84

7.6.2 Flujo 85
7.6.2.1 Flujo Fibra 1 85
7.6.2.2 Flujo Fibra 2 86
7.6.2.3 Flujo Fibra 3 87
7.6.3 Densidad Bulk 87
7.6.3.1 Densidad Bulk Fibra 1 87
7.6.3.2 Densidad Fibra 2 88
7.6.3.3 Densidad Bulk Fibra 3 89
7.6.4 Vacíos 89
7.6.4.1 Vacíos Fibra 1 89
7.6.4.2 Vacíos Fibra 2 90
7.6.4.3 Vacíos Fibra 3 91
7.7 Comportamiento mecánico de concretos hidráulicos modificados con fibras y resistencia de diseño Mr=4.0 y 4.5 MPa 93
7.7.1 Módulo de elasticidad de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia Mr=4.0 MPa 93
7.7.2 Módulo de elasticidad de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia Mr=4.5 MPa 96
7.7.3 Resistencia a la compresión simple de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia de Mr=4.0 MPa. 100
7.7.4 Resistencia a la compresión simple de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia de Mr=4.5 MPa. 103
7.7.5 Resistencia al módulo de rotura de concretos hidráulicos con Mr=4.0 MPa. 106
7.7.6 Resistencia al módulo de rotura de concretos hidráulicos con Mr=4.5 MPa. 109
7.8 Comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras. 112
7.8.1 Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras. 112
7.8.2 Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con y sin adición de fibras. 115
7.8.3 Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 117

7.8.4 Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 118

7.8.5 Módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras..... 119

7.8.6 Módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras..... 128

7.8.7 Leyes de fatiga mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras 137

7.8.8 Leyes de fatiga mezclas asfálticas con granulometría MS25 con y sin adición de fibras 140

8. Equipo de trabajo 143

9. Conclusiones y recomendaciones 144

10. Bibliografía..... 152

Índice de Graficas

Figura 1. Estado de esfuerzos y deformaciones de una estructura de pavimento. Liu et al, 2013 5
Figura 2. Procedimientos ejecución ensayos de fatiga en mezclas asfálticas. AENOR, 2003 6
Figura 3. Dimensiones probetas trapezoidales según tamaño de la granulometría de la mezcla asfáltica. AENOR, 2003 7
Figura 4. Máquina de fatiga de muestras trapezoidales. Aenor,2003 7
Figura 5. Equipo deformación plástica – Universidad Politécnica de Cataluña. Padilla,A., 2004 8
Figura 6. Diagrama del ensayo de resistencia a la tracción indirecta. AENOR, 2003 9
Figura 7. Curvas módulo resiliente en función de la frecuencia y temperatura. 10
Figura 8. Dispositivo ejecución ensayos de módulo resiliente y pulsos de carga. AENOR, 2003 10
Figura 9. Estado de esfuerzos de pavimentos flexibles y rígidos. 11
Figura 10. Dispositivo para evaluar el módulo de rotura de concretos hidráulicos. INVIAS, 2007 11
Figura 11. Diagrama de módulo de elasticidad del concreto. Londoño, C., 2004 12
Figura 12. Dispositivo determinación módulo elasticidad del concreto. 12
Figura 13. Dispositivo para ejecutar ensayos de compresión simple en concretos hidráulicos 13
Figura 14. Porcentaje asfalto vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009 14
Figura 15. Relación de vacíos vs. % fibras poliéster Huaxin Chen, 2009 14
Figura 16. Densidad Bulk vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 17. Estabilidad Marshall vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 18. Estabilidad dinámica, deformación plástica vs. Contenido de fibra. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 19. Densidad Bulk vs. Tipo fibra. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 20. Estabilidad Marshall vs. Tipo fibra. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 21. Relación de vacíos vs. Tipo fibras. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 22. Flujo vs. tipo fibras. Huaxin Chen, 2009 15
Figura 23. Módulo dinámico vs tipo fibras. Qunshan Ye, 2009 17
Figura 24. Parámetro de fatiga vs. Tipo fibra. Qunshan Ye, 2009 17
Figura 25. Resistencia compresión Vs. Tipo fibras y periodos de curado. Fang Xu et al, 2014 18
Figura 26. Módulo dinámico de elasticidad con respecto tipo fibra y ciclos de carga. Fang Xu et al, 2014 18
Figura 27. Comportamiento a fatiga de concretos. Medeiros et al, 2015 20
Figura 28. Resistencia concreto sin modificar. Medeiros et al, 2015 20
Figura 29. Resistencia concreto con fibras de polipropileno. Medeiros et al, 2015 20
Figura 30. Resistencia concreto con fibras metálicas. Medeiros et al, 2015 20

Figura 31. Características de las fibras sintéticas y metálicas utilizadas en la investigación. Carnio et al, 2009. 21
Figura 32. Comportamiento a compresión simple de concretos con fibras sintéticas a diferentes porcentajes y longitudes. Carnio et al, 2009 21
Figura 33.Respuesta acústica de la vía con diferentes materiales. Nobiili et al, 2014 22
Figura 34. Módulo resiliente vs. % fibras. Reyes et al, 2005..... 23
Figura 35. Deformación plástica vs. % fibra. Reyes et al, 2005..... 23
Figura 36. Mezcla de agregado y fibras por vía seca Pyeong et al, 2015..... 23
Figura 37. RTI vs fibras de polipropileno. Pyeong et al, 2015..... 24
Figura 38. Ahuellamiento vs ciclos de carga. Pyeong et al, 2015 24
Figura 39. Micro Refuerzo del concreto. Madhkhan et al, 2012 25
Figura 40. Resistencia compresión concreto con y sin fibra tipo P0. Madhkhan et al, 2012 25
Figura 41. Resistencia compresión concreto con fibra tipo P30. Madhkhan et al, 2012 25
Figura 42. Resistencia módulo rotura concreto con y sin fibra tipo P0, P15 y P30. Madhkhan et al, 2012 26
Figura 43. Resistencia compresión concreto con y sin fibra tipo P30 a diferentes dosificaciones. Madhkhan et al, 2012 26
Figura 44. Refuerzo con desperdicio de llanta. Gaio et al, 2012 26
Figura 45. Refuerzo con fibras metálicas. Gaio et al, 2012..... 26
Figura 46. Densidad Bulk vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014 27
Figura 47. Estabilidad Marshall vs. Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014..... 27
Figura 48. Relación de vacíos vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014 27
Figura 49. Flujo Marshall vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014..... 27
Figura 50. Refuerzos de macrofibras Sikafiber®600. Sika, 2010 28
Figura 51. Resistencia del concreto con macrofibras y sin fibras. Sika, 2010..... 28
Figura 52. Comportamiento de mezclas con y si aramida y otros productos. Kamil et al, 2010..... 29
Figura 53. R. tracción indirecta de mezclas asfálticas con y si aramida y otros productos. Kamil et al, 2010..... 29
Figura 54. Fibras de polipropileno y polietileno. 36
Figura 55. Fibras de polipropileno homopolimero virgen, sin materiales de oleofina y multifilamento. 36
Figura 56. Fibras de aramida, poliolefina y otros polímeros..... 37
Figura 57. Fibras metálicas, forma cilíndrica y curva en sus extremos. 37
Figura 58. Fibras metálicas de acero en forma de lámina..... 38
Figura 59. Fibras de copolímeros y polipropileno virgen. 38
Figura 60. Ensayo Punto de ablandamiento 39
Figura 61. Equipo de penetración de asfaltos 39
Figura 62. Ensayo Punto de ignición y llama..... 40
Figura 63. Curva viscosidad vs Temperatura 41

Figura 64. Reómetro de corte dinámico para asfaltos..... 42
Figura 65. Curva maestra del asfalto utilizado en la investigación..... 42
Figura 66. Curva de Creep con recuperación del asfalto 60/70, con un ciclo de carga y un esfuerzo 3200 Pa. 43
Figura 67. Curva de Creep del asfalto 60/70, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo. 44
Figura 68. Curva granulométrica mezcla asfáltica caliente cerrada – MD12..... 45
Figura 69: Curva granulométrica mezcla asfáltica cerrada – MS25..... 45
Figura 70. Aparato Le Chatelier 46
Figura 71. Aparato Blaine 47
Figura 72. Aparato de Vicat 49
Figura 73. Tiempos de Fraguado..... 50
Figura 74. Curva granulométrica de la grava del Río Frío – Tabio 51
Figura 75. Curva granulométrica de la arena del Río Frío - Tabio 51
Figura 76. Esquema diseño mezclas de concreto hidráulico. Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 52
Figura 77. Asentamiento del concreto hidráulico del estudio 53
Figura 78. Adquisición del material pétreo para la fabricación del concreto hidráulico 59
Figura 79. Proceso de mezclado de materiales para fabricar concreto hidráulico. 59
Figura 80. Elaboración de probetas cilíndricas y viguetas de concreto..... 60
Figura 81. Ejecución de ensayos de compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura..... 60
Figura 82. Bolsas con la granulometría MD12 y MS25 para fabricar probetas Marshall. .. 61
Figura 83. Mezclado de los materiales de asfalto, agregado y fibras sintéticas 61
Figura 84. Compactación de probetas y moldes de compactación..... 61
Figura 85. Estabilidad, flujo, densidad y vacíos mezclas asfálticas 61
Figura 86. Fabricación de probetas con el compactador giratorio 62
Figura 87. Fabricación de probetas con el compactador de rodillo..... 62
Figura 88. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 74
Figura 89. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2**.** 75
Figura 90. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 75
Figura 91. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 76
Figura 92. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 77
Figura 93. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 77
Figura 94. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 78
Figura 95. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 79
Figura 96. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 79
Figura 97. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1..... 80
Figura 98. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2..... 81
Figura 99. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3..... 81

Figura 100. Comportamiento de la estabilidad, densidad, flujo y vacíos los diseños Marshall de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras. 82
Figura 101. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 83
Figura 102. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 84
Figura 103. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 85
Figura 104. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 86
Figura 105. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 86
Figura 106. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 87
Figura 107. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 88
Figura 108. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 88
Figura 109. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 89
Figura 110. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1. 90
Figura 111. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2. 91
Figura 112.Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3. 92
Figura 113 Comportamiento de la estabilidad, densidad Bulk, flujo y vacíos de los diseños Marshall de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras. 93
Figura 114. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 94
Figura 115. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 95
Figura 116. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 95
Figura 117**.** Incrementos del módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 96
Figura 118. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 97
Figura 119. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 98
Figura 120. Módulo de elasticidad del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 98
Figura 121. Incrementos del módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 99
Figura 122. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 100
Figura 123.Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 101
Figura 124. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 102
Figura 125. Incremento Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 103

Figura 126.Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 104
Figura 127. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 104
Figura 128. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 105
Figura 129. Incrementos Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 106
Figura 130. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 107
Figura 131. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 107
Figura 132. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 108
Figura 133. Incrementos del módulo rotura del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa. 109
Figura 134. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 110
Figura 135. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 110
Figura 136. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 111
Figura 137. Incrementos módulo rotura promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa. 112
Figura 138. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 1. 113
Figura 139. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 2. 114
Figura 140. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 3. 114
Figura 141. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 1. 115
Figura 142. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 2. 115
Figura 143. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 3. 116
Figura 144. Incremento resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras. 117
Figura 145. Incremento Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras. 118

Figura 146. Incremento Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras..... 119
Figura 147. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 10°C 120
Figura 148. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 15°C 120
Figura 149. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 20°C 121
Figura 150. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 25°C 121
Figura 151. Incremento Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 122
Figura 152. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 10°C 123
Figura 153. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 15°C 123
Figura 154. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 20°C 124
Figura 155. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 25°C 124
Figura 156. Incremento Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 125
Figura 157. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 10°C 126
Figura 158. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 15°C 126
Figura 159. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 20°C 127
Figura 160. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 25°C 127
Figura 161. Incremento Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 128
Figura 162. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 10°C 129
Figura 163. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 15°C 129
Figura 164. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 20°C 130
Figura 165. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 25°C 130
Figura 166. Incrementos Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 131

Figura 167. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 10°C..... 132
Figura 168. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 15°C..... 132
Figura 169. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 20°C..... 133
Figura 170. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 25°C..... 133
Figura 171. Incrementos Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2..... 134
Figura 172. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 10°C..... 135
Figura 173. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 15°C..... 135
Figura 174. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 20°C..... 136
Figura 175. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 25°C..... 136
Figura 176. Incrementos Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3..... 137
Figura 177. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 1. 138
Figura 178. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 2. 138
Figura 179. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 3. 139
Figura 180. Incrementos deformación millón de ciclos y pendiente leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 1, 2 y 3 a diferentes dosificaciones. 139
Figura 181. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 1. 140
Figura 182. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 2. 141
Figura 183. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 3. 141
Figura 184. Incrementos deformación millón de ciclos y pendiente leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 1, 2 y 3 a diferentes dosificaciones. 142

Índice de Tablas

Tabla 1. Características del poliéster 16
Tabla 2. Resultados de G* y ángulo fase de asfaltos modificados con fibras. 16
Tabla 3. Características de las fibras empeladas en la investigación. 17
Tabla 4. Comportamiento a flexión y compresión de concreto reforzado con fibras de poliéster 18
Tabla 5. Características fibras de refuerzo en mezcla de concreto. 18
Tabla 6. Características del concreto con y sin fibras de polipropileno. 20
Tabla 7.Características de las fibras de polipropileno 22
Tabla 8. Propiedades de las fibras de polipropileno 24
Tabla 9. Comportamiento a las fisuras de un concreto con fibras Sikafiber AD y malla electrosoldada. 28
Tabla 10 Características de fibras, tipo pavimento y ventajas 30
Tabla 11. Especificaciones fibras sintéticas utilizadas en las mezclas asfálticas 36
Tabla 12. Especificaciones fibras sintéticas y metálicas utilizadas en las mezclas de concreto hidráulico 37
Tabla 13. Resultados ensayo punto de ablandamiento 39
Tabla 14. Resultados ensayo de penetración de asfaltos. 40
Tabla 15. Viscosidad vs temperatura asfalto 60/70 41
Tabla 16. Características del agregado 44
Tabla 17. Tabla curva granulométrica mezcla asfáltica - MD12 45
Tabla 18. Curva granulométrica mezcla asfáltica - MS25 46
Tabla 19 Densidad del cemento – Aparato Le Chatelier 46
Tabla 20. Calibración aparato Blaine 47
Tabla 21. Finura del cemento de la investigación 47
Tabla 22. Determinación masa unitaria del cemento 48
Tabla 23. Masa Unitaria del cemento 48
Tabla 24. Consistencia del cemento 49
Tabla 25. Tiempo fraguado cemento 49
Tabla 26. Agregado pétreo 50
Tabla 27. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción. 53
Tabla 28 Tamaños máximos de agregados según la construcción. 53
Tabla 29. Cantidad aproximada de aire esperado en el concreto. 54
Tabla 30 Requerimiento aproximado de agua para la mezcla. 54
Tabla 31. Normas para el control del concreto. 55
Tabla 32 Relación agua/cemento 55
Tabla 33 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. 56
Tabla 34 Diseño mezcla sin fibras, resistencia Mr= 4.0 y 4.5 MPa 56
Tabla 35. FIBRA 1, dosificación 7.5 kilos /m3 57
Tabla 36. FIBRA 1, dosificación 8.75 kilos /m3 57
Tabla 37. FIBRA 1, dosificación 10.5 kilos /m3 57

Tabla 38- FIBRA 2, dosificación 7.5 kilos /m3 57
Tabla 39. FIBRA 2, dosificación 8.75 kilos /m3 57
Tabla 40. FIBRA 2, dosificación 10.5 kilos /m3 58
Tabla 41 FIBRA 3, dosificación 4.0 kilos /m3 58
Tabla 42. FIBRA 3, dosificación 4.5 kilos /m3 58
Tabla 43. FIBRA 3, dosificación 5.0 kilos /m3 58
Tabla 44. Resultados diseños Diseño mezcla asfáltica virgen MD12 63
Tabla 45. Resultados diseños Diseño mezcla asfáltica virgen MS25..... 63
Tabla 46. Resistencia promedio a la compresión simple de concretos hidráulicos Mr= 4.0 MPa sin y con adición de fibras. 64
Tabla 47. Resistencia promedio a la compresión simple de concretos hidráulicos Mr= 4.5 MPa sin y con adición de fibras..... 65
Tabla 48. Módulo promedio de elasticidad de concretos hidráulicos con Mr= 4.0 MPa, sin y con fibras 65
Tabla 49. Módulo promedio de elasticidad de concretos hidráulicos con Mr= 4.5 MPa, sin y con fibras 66
Tabla 50. Módulo rotura promedio de concretos hidráulicos con diseño de Mr= 4.0 MPa, sin y con fibras 66
Tabla 51. Módulo rotura promedio de concretos hidráulicos con diseño de Mr= 4.5 MPa, sin y con fibras 67
Tabla 52. Módulo resiliente promedio mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen..... 68
Tabla 53. Módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen..... 68
Tabla 54. Resistencia conservada promedio mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen. 69
Tabla 55. Resistencia conservada promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen..... 69
Tabla 56. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen 70
Tabla 57. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen 70
Tabla 58. Deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas MD12..... 71
Tabla 59. Deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas MS25..... 71

1. Preliminares

El INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO - IDU, establecimiento público del orden distrital, creado mediante Acuerdo No. 19 de 1972 del Concejo de Bogotá, tiene entre sus funciones liderar y orientar la investigación constante de nuevas tecnologías, técnicas y normas en materia de gestión y desarrollo de la infraestructura para los Sistemas de Movilidad y de Espacio Público Construido a cargo de la entidad y la Universidad Militar Nueva Granada (UMNG), Institución de Educación Superior Oficial, creada mediante Decreto Ley número 84 de 23 de enero de 1980, con reconocimiento institucional otorgado por el Ministerio de Educación Nacional, mediante Resolución No. 12975 de 23 de julio de 1982, tiene dentro de sus objetivos principales la educación superior y la investigación, razón por la cual en el año 2014 mediante convenio interadministrativo de cooperación 1819 de 2014, acordaron aunar esfuerzos para desarrollar el "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE DESEMPEÑO DE MATERIALES DE INFRAESTRUCTURA VIAL A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO" y concertaron aportar financieramente en conjunto la suma de $250.000.000 de pesos, distribuidos en $200.000.000 por el IDU y $50.000.000 por la UMNG.

Las actividades programadas a desarrollar dentro del convenio fueron establecidas en cinco grandes grupos así:

- **Definición del Programa experimental:** Elaboración del cronograma de ensayos a ejecutar dentro del convenio, con la recomendación del tipo de ensayos a ejecutar, temperaturas, frecuencias, tipo de aditivos entre otros, tanto para pavimentos flexibles como pavimentos rígidos. Así mismo, elaboración de un estado del arte a nivel nacional e internacional, que de soporte a las recomendaciones del plan de ensayos. Este documento será el soporte para el primer desembolso, que equivale al 25% del valor aportado por el IDU.

- **Informe de consecución y caracterización de materiales y del estudio del comportamiento mecánico y desempeño de materiales:** Elaboración del informe de las características de los materiales del estudio, comportamiento mecánico de los materiales y diseños de las mezclas asfálticas y de concreto hidráulico. Este documento será el soporte para el segundo desembolso, equivalente al 20% del recurso aportado por el IDU.

- **Informe análisis de resultados y planteamiento de recomendaciones y conclusiones**: Elaboración del informe de los resultados del programa experimental, con el planteamiento de recomendaciones y conclusiones. Este documento será el soporte para el tercer desembolso, que equivale al 30% del valor aportado por el IDU.

- **Documento técnico final y la divulgación de resultados**: Elaboración del informe final y divulgación de resultados del estudio desarrollado en función del programa experimental aprobado en la primera etapa del convenio. Este documento será el soporte para el cuarto desembolso, que equivale al 15% del valor aportado por el IDU.

- **Acta de liquidación del convenio**: Con el acta de liquidación del convenio, se realizará el último desembolso, saldo del valor aportado por el IDU (10%).

El día 27 de enero de 2015, mediante la firma del acta de inicio del convenio interadministrativo 1819 de 2014 entre el IDU-UMNG, cuyo objeto principal fue el: “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE DESEMPEÑO DE MATERIALES DE INFRAESTRUCTURA VIAL A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO”, se dio inició al convenio entre las partes y se creó un COMITÉ OPERATIVO, el cual tuvo como finalidad y funciones la aprobación del cronograma de ejecución, liderar y coordinar los análisis y acciones para cumplir el objetivo del convenio, orientar las actividades del convenio y presentar informes del convenio. Dicho comité estuvo integrado por El Director del IDU y Rector de la UMNG, o las personas designadas para tales fines mediante actos administrativos. En el caso de la Universidad Militar Nueva Granada, el representante legal de la Universidad mediante resolución 0091 de 2015, designó a los ingenieros Leonardo Juan Ramírez López y Oscar Javier Reyes Ortiz como integrantes del comité operativo y como director del proyecto al ingeniero Oscar Javier Reyes Ortiz. Así mismo, mediante memorando No. 20152150053923 del 23 de febrero de 2015, el Director del IDU delego para el comité operativo a la Ingeniera Sully Magalis Rojas Bayona, Directora Técnica Estratégica. Los respectivos documentos de soporte se encuentran en el Anexo N. 1.

2. Introducción y objetivos del convenio

El Instituto de Desarrollo Urbano – IDU, a través de La Dirección Técnica Estratégica, en el año de 2014, en alianza con la Universidad Militar Nueva Granada, plantearon la posibilidad de aunar esfuerzos para adelantar un estudio del comportamiento mecánico y desempeño de materiales empleados en la infraestructura vial a través de ensayos de laboratorio. El resultado de la alianza fue la firma del convenio interadministrativo 1819 de 2014, con fecha 17 de diciembre de 2014 y definido como: "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE DESEMPEÑO DE MATERIALES DE INFRAESTRUCTURA VIAL A TRAVÉS DE ENSAYOS DE LABORATORIO (Anexo N. 2). Los objetivos planteados y ejecución del convenio, se dividió en cinco actividades principales, siendo las primeras cuatro actividades: el estudio del comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU al adicionar fibras sintéticas de diferentes porcentajes y características. Así mismo, la evaluación de la respuesta mecánica y de desempeño de mezclas de concreto hidráulico con adición de fibras metálicas y sintéticas con diseño de módulo de rotura de 4.0 MPa y 4.5 MPa. La última actividad, corresponderá al acta de liquidación del convenio y la cesión de derechos de autor del mismo.

A continuación se describen detalladamente las cuatro primeras actividades del convenio:

La primera actividad, ***Programa experimental,*** se desarrolló en el mes de febrero y marzo de 2015 y correspondió a la revisión del estado del arte del comportamiento de pavimentos flexibles y rígidos con adición de fibras, el plan experimental detallado de la caracterización de materiales para la fabricación de mezclas asfálticas y concreto hidráulico (asfalto, cemento, agregado grueso y fino), diseño de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU mediante la metodología Marshall (con y sin adición de tres fibras sintéticas de diferentes características y tres porcentajes por fibra), diseño de concreto hidráulico con resistencia de módulo de rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras (dos metálicas y una sintética y tres porcentajes por fibra), ensayos de laboratorio para la caracterización mecánica y dinámica de las mezclas asfálticas y de concreto hidráulico a estudiar) fechas de entrega de informes y facturas, conclusiones y recomendaciones del estudio, divulgación de los resultados y liquidación del convenio. El informe correspondiente se radico el día 19 de marzo de 2015 (Anexo N. 3)

La segunda actividad, ***Consecución y caracterización de materiales y del estudio del comportamiento mecánico y desempeño de materiales,*** se desarrolló entre marzo y agosto de 2015 y consistió en la consecución y caracterización de los materiales para el estudio (asfalto, cemento, agregado grueso, agregado fino, fibras sintéticas para pavimentos flexibles, fibras metálicas y sintéticas para pavimentos rígidos), en el desarrollo del programa experimental formulado en la actividad primera, que contemplo el diseño de mezcla de concreto hidráulico de módulo de rotura de 4.0 MPa y 4.5 MPa (con y sin adición de fibras metálicas y sintéticas a tres diferentes porcentajes), el diseño de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU mediante el procedimiento Marshall (con y sin adición de fibras sintéticas de diferentes características y tres porcentajes de dosificación), la fabricación de probetas y ejecución de ensayos de módulo de rotura (ensayo de viga con carga en el tercio central), resistencia a la compresión simple y módulo de elasticidad para mezclas de concreto hidráulico con

resistencia de módulo de rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa con y sin fibras y para periodos de curado de 3,7,14 y 28 días, la fabricación y caracterización de desempeño de las mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras sintéticas, mediante los ensayos de módulo resiliente, leyes de fatiga, deformación plástica y resistencia conservada. El informe correspondiente se se radico el día 28 de agosto de 2015 (Anexo N. 4).

La tercera actividad, **Análisis de resultados y planteamiento de recomendaciones y conclusiones,** desarrollada entre agosto y octubre de 2015, correspondió al análisis de todos los resultados experimentales obtenidos en el estudio y el planteamiento de recomendaciones y conclusiones. Los ensayos ejecutados y analizados fueron:

- Comportamiento mecánico de los materiales (Asfalto, cemento, agregados pétreos para mezclas asfálticas y mezclas de concreto hidráulico).
- Diseño mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU, con y sin adición de fibras sintéticas de diferentes características y a tres dosificaciones.
- Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU, con y sin adición de fibras.
- Módulo resiliente de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU, con y sin adición de fibras.
- Leyes de fatiga de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU, con y sin adición de fibras.
- Resistencia conservada a partir de la relación de ensayos de resistencia a la tracción indirecta en estado seco y húmedo de mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25 del IDU, con y sin adición de fibras.
- Diseño de mezclas de concreto hidráulico con resistencia al módulo rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras.
- Resistencia a la compresión simple de concretos hidráulicos con módulo rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras y periodos de curado 3, 7, 14 y 28 días.
- Módulo de elasticidad de concretos hidráulicos con módulo rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras y periodos de curado 3, 7, 14 y 28 días.
- Módulo de rotura de concretos hidráulicos con módulo rotura 4.0 MPa y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras y periodos de curado 3, 7, 14 y 28 días.

El informe correspondiente se radico el día 3 de noviembre de 2015 (Anexo N. 5)

La cuarta actividad, **Documento técnico final y divulgación de resultados,** fueron desarrollados entre septiembre y noviembre de 2015 y correspondieron en la elaboración del informe final y divulgación de los resultados del estudio. La socialización de los resultados se realizaro en el XX SIMPOSIO COLOMBIANO DE INGENIERIA DE PAVIMENTOS (Anexo N. 6) y en el auditorio de las instalaciones del INSTITUTO DE DESARROLLO URBANO – IDU (Anexo N. 7). Finalmente, la elaboración y entrega del informe final se ejecutó a finales de noviembre, dentro del periodo establecido en el convenio.

3. Estado del arte

Las estructuras de pavimento están constituidas por múltiples capas relativamente horizontales y cuya principal función es brindar seguridad al usuario y absorber adecuadamente el estado de esfuerzos y deformaciones que producen el espectro de carga, el flujo vehicular y las condiciones climatológicas a lo largo de su vida útil [1]. (Figura 1) [2].

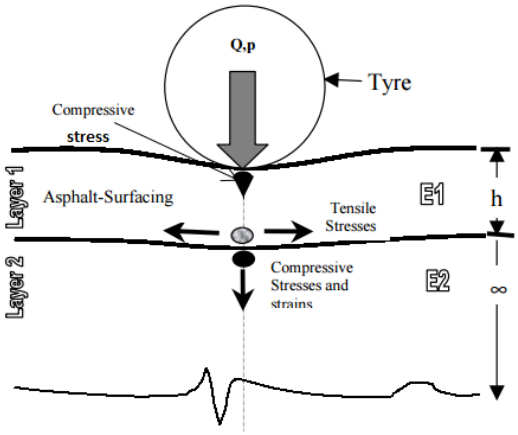
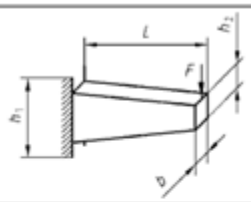
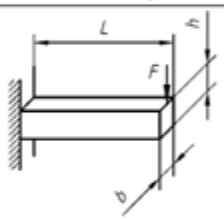
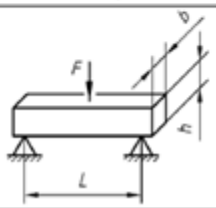
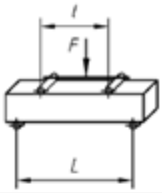
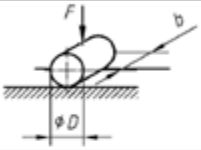
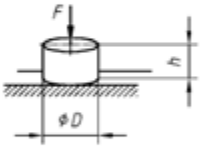
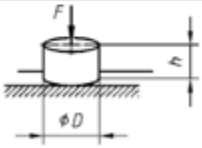


Figura 1. Estado de esfuerzos y deformaciones de una estructura de pavimento. Liu et al, 2013

Los deterioros de las capas de los pavimentos están asociadas especialmente a las condiciones expuestas anteriormente y los daños más comunes que presentan son: fatiga, deformación plástica, daño por humedad, agrietamiento, baches, rotura entre otros. Es por esto, que a lo largo de la historia se han desarrollado pruebas de laboratorio estáticas y dinámicas que tratan de caracterizar los materiales empleados en la construcción de vías y simular de la manera más precisa las condiciones climatológicas y el estado de esfuerzos y deformaciones. Entre las pruebas más utilizadas para diseñar y caracterizar las mezclas asfálticas están las leyes de fatiga, módulo resiliente, resistencia conservada, deformación plástica, creep, diseño Marshall, ensayos a escala real entre otras. Así mismo, en las mezclas de concreto hidráulico se utiliza el módulo de rotura, la resistencia a la compresión simple, el módulo de elasticidad y ensayos a escala real.

El fenómeno de la fatiga de los materiales asfálticos depende de múltiples factores como las características del asfalto y agregado, el diseño de la mezcla, el proceso de compactación, el espesor de la capa, las condiciones ambientales y especialmente a los ciclos y magnitud de las carga, que inciden directamente en la pérdida de rigidez de la mezcla y su deterioro a lo largo del tiempo. Desde hace varias décadas diferentes universidades y centros de investigación han desarrollado normas y procedimientos para evaluar la fatiga de pavimentos flexibles mediante acondicionamientos de temperatura y aplicación de esfuerzos o deformaciones en probetas de diferentes geometrías y mediante ensayos de flexión o tensión directa o indirecta (Figura 2) [3], que sirven para diseñar y construir vías con mejores especificaciones.

Tipo de carga		Factor de forma, γ L^{-1}	Factor de masa, μ
2PB-TR		$\frac{12L^3}{b(h_1-h_2)^3}\left[(2-\frac{h_2}{2h_1})\frac{h_2}{h_1}-\frac{3}{2}-\ln\frac{h_2}{h_1}\right]$	$0{,}135\,M+m$ [a]
2PB-PR		$\frac{4L^3}{bh^3}$	$\frac{M}{4}+m$
3PB-PR		$\frac{24L^3}{\pi^4 bh^3}\approx\frac{L^3}{4bh^3}$	$\frac{M+m}{2}$
4PB-PR		$\frac{L^2A}{bh^3}\left(\frac{3}{4}-\frac{A^2}{L^2}\right)$ [b]	$R(X)\left(\frac{M}{\pi^4}+\frac{m}{R(A)}\right)$ [b]
IT-CY		$\frac{1}{b}\times(\nu+0{,}27)$	–
DTC-CY		$\frac{4h}{\pi D^2}$	$\frac{M}{2}+m$
DT-CY **DT-PR**		1	0

[a] Para dimensiones habituales de probetas.

[b] $R(X)=\frac{12L}{A}\times\left[\frac{1}{(3XL-3X^2/L^2-A^2/L^2)}\right]$, $A=\frac{L-l}{2}$, X = coordenada donde se mide la deflexión.

Figura 2. Procedimientos ejecución ensayos de fatiga en mezclas asfálticas. AENOR, 2003

En Colombia, uno de los procedimientos más utilizado para determinar la fatiga de mezclas asfáltica ha sido aplicar ciclos de deformaciones controladas en probetas trapezoidales y apoyadas en dos puntos. El procedimiento consiste en fabricar muestras de geometría trapezoidal cuyas dimensiones aparecen en la Figura 3 y dependen de la

granulometría de la mezcla asfáltica a ensayar [3]. Posteriormente se empotran las probetas en las bases del banco de fatiga, se crea una temperatura regulada constante y se aplica un desplazamiento controlado de forma senosoidal en la parte superior de la muestra, de tal manera que se pueda medir a lo largo del ensayo la carga que soporta cada probeta. El ensayo finaliza cuando se alcanza la mitad de la carga inicial. Para determinar la ley de fatiga es necesario tener tres deformaciones diferentes y ciclos de carga superiores e inferiores a un millón de ciclos (Figura 4) [3].

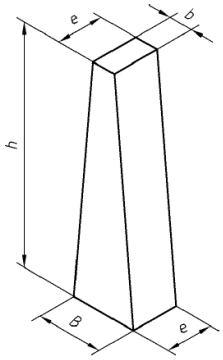


Figura A.2 – Geometría de las probetas

Tabla A.1 – Dimensiones de las probetas

Dimensiones de las probetas	Tipo de mezcla		
	$D \leq 14$ mm	$14 < D \leq 20$ mm	$20 < D \leq 40$ mm
B	56 ± 1 mm	70 ± 1 mm	70 ± 1 mm
b	25 ± 1 mm	25 ± 1 mm	25 ± 1 mm
e	25 ± 1 mm	25 ± 1 mm	50 ± 1 mm
h	250 ± 1 mm	250 ± 1 mm	250 ± 1 mm

Figura 3. Dimensiones probetas trapezoidales según tamaño de la granulometría de la mezcla asfáltica. AENOR, 2003

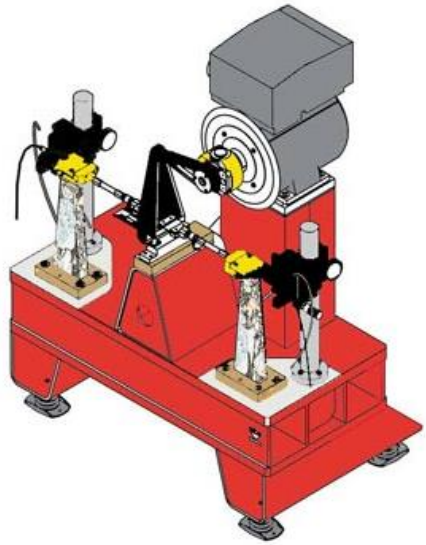


Figura 4. Máquina de fatiga de muestras trapezoidales. Aenor,2003

El daño denominado deformación permanente o ahuellamiento que sufren las capas de rodadura fabricadas con mezclas asfálticas y que se caracteriza por la formación de surcos a lo largo del flujo vehicular se debe especialmente a procesos constructivos,

malos diseños, cargas excesivas, condiciones climatológicas y temperaturas elevadas [1]. Para reducir el potencial de deformaciones en los pavimentos, actualmente existen diferentes procedimientos de ensayos que buscan simular las condiciones de temperatura y carga al cual es sometido un pavimento. Dentro de las especificaciones existentes, el Instituto de Desarrollo Urbano-IDU y el Instituto Nacional de Vías-INVIAS han utilizado la norma técnica INV E-756-07, la cual determina la resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio [4]. El procedimiento establecido en la norma consiste en fabricar una probeta prismática de 300mm*300mm*50mm, cuya densidad debe ser mínimo el 97% la establecida en el diseño Marshall y compactada mediante proceso de vibración. La primera parte del ensayo es acondicionar la muestra a temperatura constante por dos horas y mantenerla durante el ensayo. A continuación se aplica mediante una llanta maciza una presión de 900 kN/m^2 constante y una frecuencia de aplicación de 42 pasadas por minuto. El ensayo dura 120 minutos y se deben tomar lecturas a 1,3 y 5 minutos. De ahí en adelante cada 5 minutos hasta llegar a los 45 minutos. Entre los 45 minutos y 120 minutos, las lecturas se harán cada 15 minutos. El resultado del ensayo consiste en establecer la velocidad de deformación de la mezcla entre el minuto 105 y 120. (Figura 5) [5].

Figura 5. Equipo deformación plástica – Universidad Politécnica de Cataluña. Padilla,A., 2004

Las condiciones climatológicas, especialmente la humedad y lluvia han creado en las mezclas asfálticas deterioros acelerados y perdida en su vida útil, razón por la cual se han desarrollado ensayos que buscan establecer el grado de deterioro que puede tener una mezcla asfáltica ante dichas condiciones. Entre los ensayos más empleados por los diferentes investigadores en búsqueda de la afectación del daño por humedad en mezclas asfálticas, se encuentra la resistencia conservada, cuyo procedimiento consiste en determinar la relación de resistencias a la tensión indirecta en estado húmedo y seco de probetas de mezclas asfálticas. El ensayo radica en aplicar una velocidad de deformación constante de 50 mm/minuto a una probeta cilíndrica en su plano diametral (Figura 6) [3], establecer la carga máxima de resistencia y calcular el esfuerzo a tensión indirecta (Ecuación 1). La temperatura del ensayo sugerida es 25°C y el acondicionamiento para la muestra con afectación de humedad es mantener durante 24 horas sumergida en agua a 60°C antes del ensayo. El resultado del ensayo es la relación de los esfuerzos a tensión indirecta de las probetas en estado húmedo y seco, cuyo valor deberá ser superior a 80% para que no exista influencia de la humedad en la mezcla.

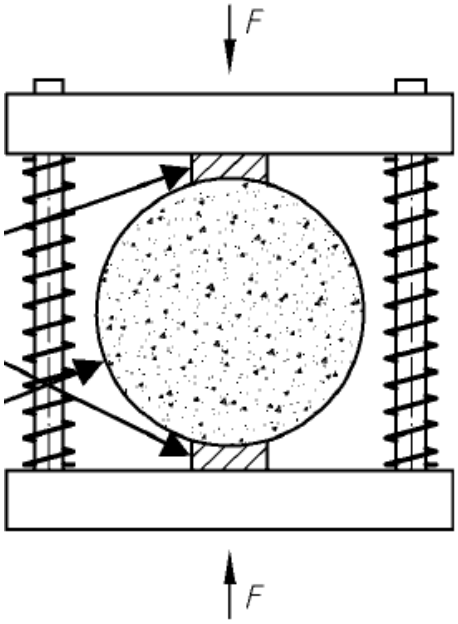


Figura 6. Diagrama del ensayo de resistencia a la tracción indirecta. AENOR, 2003

$$RTI = \frac{2000\ Qmáx}{\pi DH} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

$Q_{máx}$= Carga máxima de la muestra [kPa]
D= Diámetro de la probeta [mm]
H= Altura de la probeta [mm]

El flujo vehicular, el espectro de carga, la velocidad de operación de los vehículos y las condiciones climatológicas hacen que las capas de pavimento flexible respondan en función de estas variables. Múltiples investigaciones desarrolladas en diferentes tipos de mezclas asfálticas han podido establecer que a mayor velocidad mayor es el módulo de resiliencia y a mayor temperatura menor es el módulo (Figura 7). El ensayo para determinar la respuesta de la mezcla asfáltica ante la velocidad de los vehículos, la carga y la temperatura ambiente, está definido en la norma INV E-749-07 (Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo Resiliente de mezclas asfálticas) y su procedimiento consiste en primera instancia en tener una probeta cilíndrica tipo Marshall, la cual se lleva a una cámara de control de temperatura y se ensambla de forma diametral para aplicarle pulsos de carga según la frecuencia deseada (Figura 8) [3], las cuales pueden oscilar entre 0.1 y 40 Hz. De igual manera, se colocan dos LVDTs a los extremos de la probeta para medir las deformaciones ante la presencia de los pulsos de carga, los cuales deben estar entre el 10 y 50% de su resistencia máxima a la tracción indirecta. Con estos datos, se establece el módulo resiliente de la mezcla. [4]

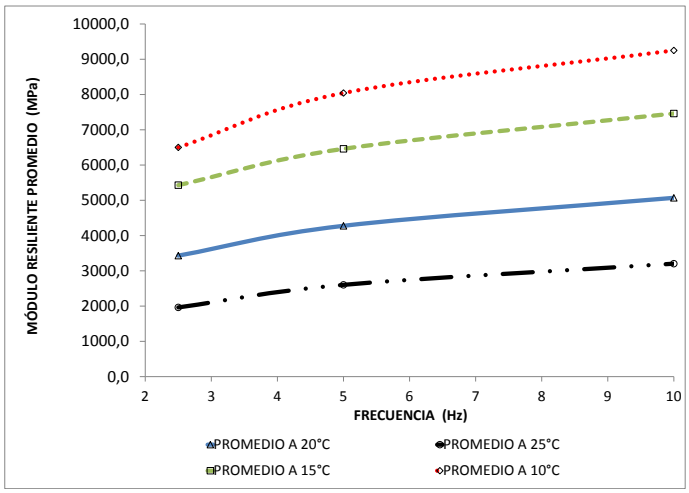


Figura 7. Curvas módulo resiliente en función de la frecuencia y temperatura.

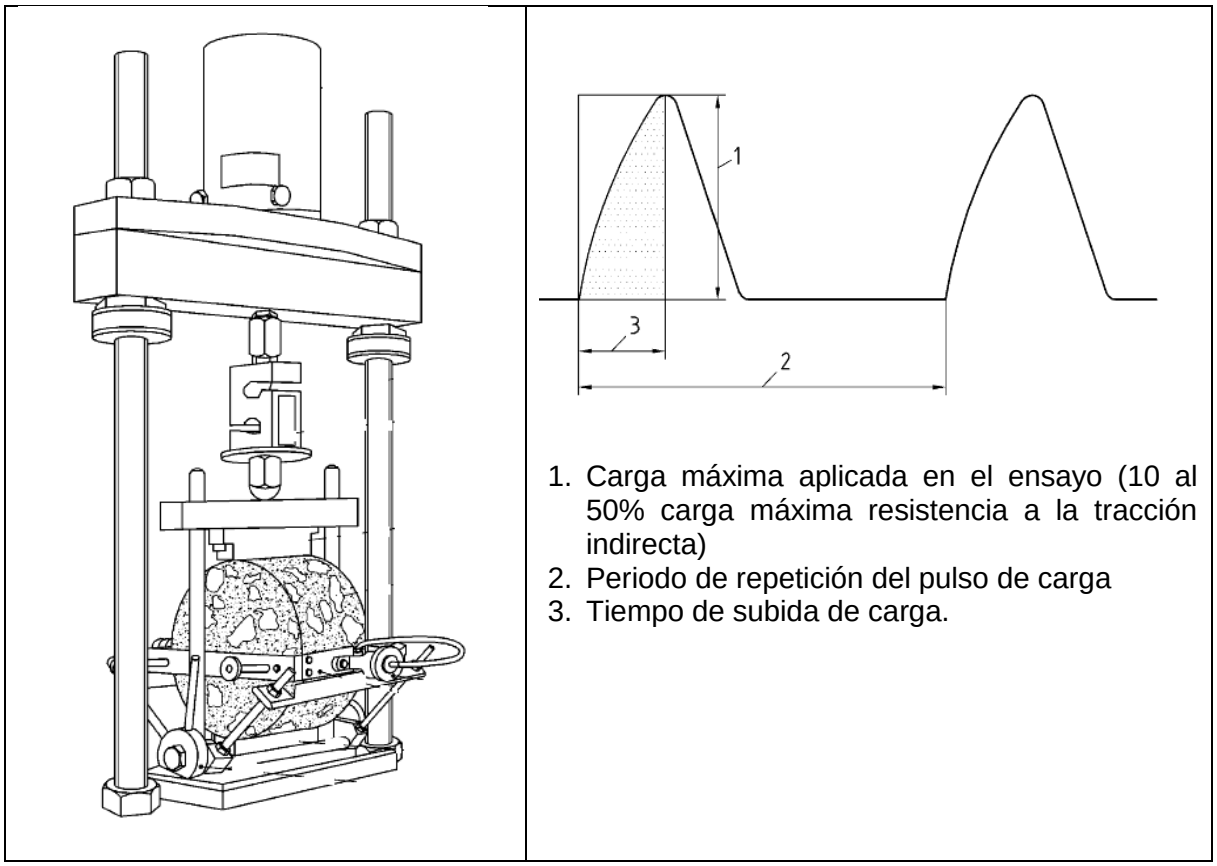


Figura 8. Dispositivo ejecución ensayos de módulo resiliente y pulsos de carga. AENOR, 2003

Las estructuras de pavimento fabricadas con concreto hidráulico tienen un comportamiento diferente a las construidas con mezcla asfáltica, especialmente por la distribución de los estados de esfuerzos y deformaciones en la capa de rodadura y en las capas granulares (Figura 9). Ese comportamiento hace que los esfuerzos absorbidos por la losa de concreto sean elevados, se generen grandes presiones en los bordes de la losa

y se produzca flexión. Debido a esta respuesta del material, las investigaciones relacionadas con pavimentos rígidos están enfocan en tres grandes propiedades del concreto, módulo de rotura, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión simple y diametral.

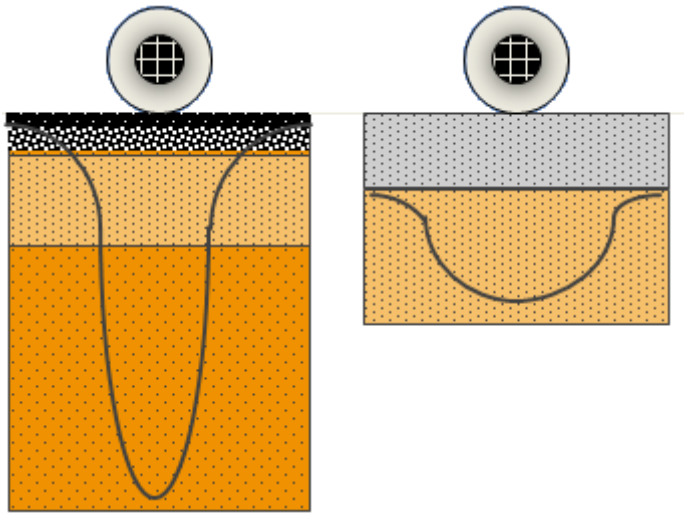


Figura 9. Estado de esfuerzos de pavimentos flexibles y rígidos.

El módulo de rotura del concreto está definido como la resistencia que tiene el material a soportar cargas a flexión y el procedimiento estipulado en Colombia para su ejecución es la Norma INV E-414 – 07, que establece colocar una viga prismática de 15cm*15cm*60cm en un dispositivo que cuenta con un sistema para apoyarse en los extremos y aplicar carga en el tercio central de la probeta, tal como se observa en la Figura 10 [4]. El módulo de rotura del concreto es el parámetro principal del diseño de pavimentos rígidos.

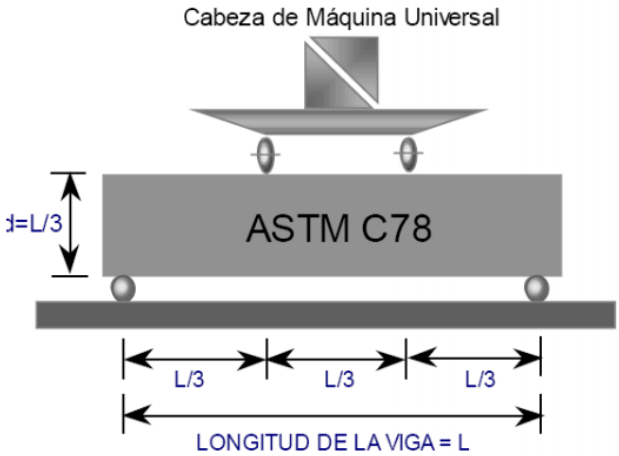


Figura 10. Dispositivo para evaluar el módulo de rotura de concretos hidráulicos. INVIAS, 2007

De otra parte, la resistencia del concreto a esfuerzos de compresión se vuelve importante para los pavimentos rígidos, ya que ante la presencia y concentración de cargas de vehículos pesados, estos pueden fallar al alcanzar valores cercanos o superiores a su

límite. Dentro de los ensayos de laboratorio existentes para determinar las propiedades de compresión del concreto se puede enunciar el módulo de elasticidad, que corresponde a la relación entre el esfuerzo al cual está sometido un material y su deformación unitaria. En otras palabras, representa la rigidez del material ante la presencia de una carga impuesta. La norma establecida en Colombia para determinar el módulo de elasticidad del concreto es la Norma Técnica Colombiana 4025 (ASTM C469) y tiene como principio aplicar una carga estática y medir su deformación unitaria. La curva característica de la respuesta del material se puede observar en la Figura 11 y consta de tres grandes partes [6].

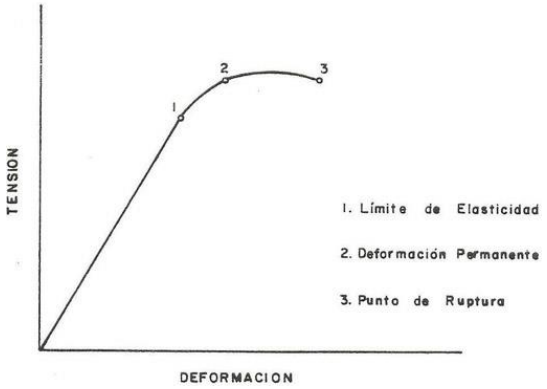


Figura 11. Diagrama de módulo de elasticidad del concreto. Londoño, C., 2004

La primera parte es denominada fase elástica y corresponde a la zona donde el esfuerzo y la deformación unitaria están directamente relacionados. La segunda fase, se presentan microfisuras y genera deformaciones permanentes al material. La tercera y última fase, es denominada punto de rotura. El dispositivo de ensayo y probeta se observan en la Figura 12. [6]

Figura 12. Dispositivo determinación módulo elasticidad del concreto.

Por último, la resistencia a la compresión simple del concreto permite establecer la característica mecánica principal del material y es definida como la capacidad de soportar una carga por unidad de área. El ensayo esta normalizado en Colombia con la norma

técnica NTC 550 y 673, las cuales incluyen la elaboración, curado y resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (Figura 13).

Figura 13. Dispositivo para ejecutar ensayos de compresión simple en concretos hidráulicos.

Como se observó anteriormente, el comportamiento mecánico y dinámico de las estructuras de pavimento tanto flexible como rígido, depende principalmente de las condiciones climatológicas, las características de sus materiales, del proceso constructivo y del espectro de carga entre otras variables Estas variables permiten de alguna manera cuantificar la posibilidad de modificar los materiales utilizados en la fabricación de las estructuras de pavimento con aditivos o procesos constructivos que cambian sus propiedades a nivel individual o compuestos [7]. Dentro de los materiales más utilizados se pueden enunciar los rejuvenecedores para el envejecimiento de asfaltos, las ceras o tenso activos para reducir temperaturas de fabricación, la adición de polímeros por vía seca o húmeda para aumentar la cohesión y adhesión en la matriz agregado-asfalto, las fibras sintéticas o naturales para crear micro o macro refuerzos, el empleo de agregados provenientes del reciclado de pavimentos, el uso de asfaltítas, endurecedores o retardantes de fraguado entre otros [8]. Sin embargo, irrelevantemente el aditivo que se emplee o proceso constructivo que se utilice, la respuesta que se busca en la nueva mezcla de concreto hidráulico o asfáltico es mantener o aumentar sus propiedades en cuanto a su resistencia a la fatiga, a la tracción, a la susceptibilidad a las condiciones climatológicas, a la flexión, a la rotura entre otras. De igual manera, se busca que los nuevos materiales reduzcan sus deformaciones y grietas ante las cargas cíclicas y la afectación de las cargas de los vehículos sea mínima. Así mismo, con estos procesos se desea contribuir de alguna manera a reducir la contaminación medioambiental a través de la reducción de gases de efecto invernadero o la optimización de los recursos naturales no renovables [9,10].

Estudios desarrollados en varios países sobre el comportamiento de mezclas asfálticas y de concreto hidráulico con adición de fibras de diferente origen, han podido demostrar que incluir este material en la mezcla representa una respuesta positiva ante el fenómeno de fatiga, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, daño a la susceptibilidad por humedad, adhesión y cohesión entre otros comportamientos [11, 12, 13, 14, 15]. De otra parte, es importante resaltar que emplear fibras de cualquier tipo de forma geométrica y propiedades dentro de las mezclas asfálticas y de concreto, genera sensibilidades a la hora de diseñar y construir las mezclas.

En la literatura de los últimos años se pueden observar múltiples tipos de fibras empleadas en la modificación de mezclas asfálticas y de concreto hidráulico, entre los cuales están:

3.1 Fibras de Poliéster

El poliéster es un producto derivado del petróleo y está en la categoría de los elastómeros. La incidencia dentro de las mezclas (asfálticas e hidráulico) utilizadas en pavimentos radica en que genera un refuerzo en la matriz de agregado y ligante, que da como resultado un incremento en las propiedades mecánicas y dinámicas, especialmente las relacionadas con la fatiga o la flexotracción que produce el flujo vehicular o el clima en las capas de una estructura de pavimento.

Dentro de los estudios desarrollados nacional e internacionalmente, se pueden enumerar los siguientes:

- Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. Journal of Materials and design. Huaxin Chen, Qinwu Xu, Shuanfa Chen y Zhengqi Zhang

  Estudio desarrollado en la Universidad Chang'an, China y cuyo objetivo principal consistió en establecer la influencia de diferentes fibras (poliéster, poliacrilonitrilo, asbesto y lignina) en el comportamiento de una mezcla asfáltica. Con respecto a fibras de poliéster, la investigación utilizó un poliéster cuyo nombre comercial es Bonifiber. La investigación referente a la fibra de poliéster se ejecutó mediante la fabricación de probetas Marshall y la adición de fibras entre 0.1% y 0.5%. Los resultados obtenidos se pueden observar en las Figuras 14, 15, 16 y 17, donde se observa un incremento en la estabilidad (5%) y vacíos (7%), así como un descenso en la densidad Bulk (0.4%), cada una de ellas favorable para la mezcla asfáltica. Adicionalmente, realizaron ensayos de deformación plástica y estabilidad dinámica, estableciendo con los ensayos Marshall, que el porcentaje óptimo es de 0.35% y que existen un comportamiento favorable (superior al 250%) en las dos propiedades enunciadas anteriormente. De otra parte, los resultados con otras fibras (poliacrilonitrilo, asbesto y lignina), establecen de igual manera que adicionarlas a las mezclas, representan mejoras en su comportamiento (Figuras 18, 19, 20 ,21 y 22).

  Por último, las características del poliéster utilizado aparecen en la Tabla N.1. [16]

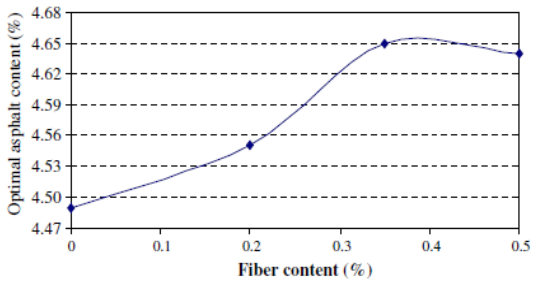


Figura 14. Porcentaje asfalto vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009

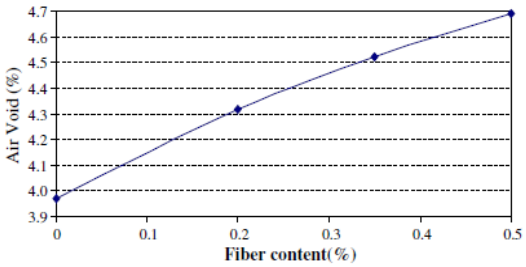


Figura 15. Relación de vacíos vs. % fibras poliéster Huaxin Chen, 2009

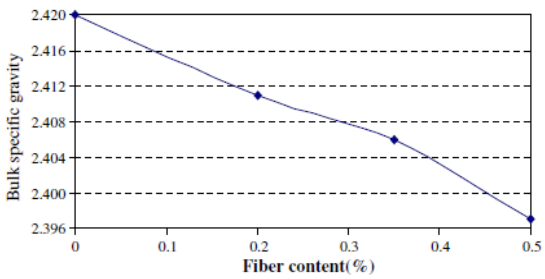


Figura 16. Densidad Bulk vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009

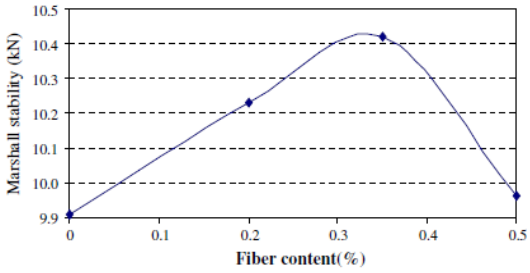


Figura 17. Estabilidad Marshall vs. % fibras poliéster. Huaxin Chen, 2009

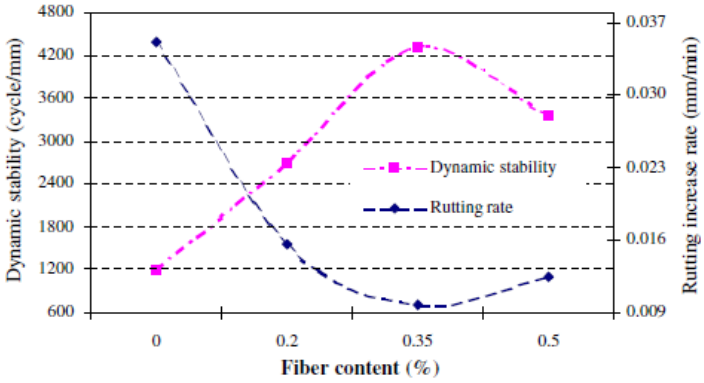


Figura 18. Estabilidad dinámica, deformación plástica vs. Contenido de fibra. Huaxin Chen, 2009

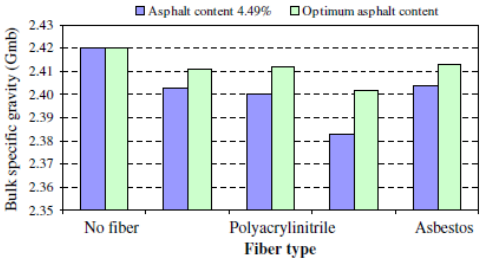


Figura 19. Densidad Bulk vs. Tipo fibra. Huaxin Chen, 2009

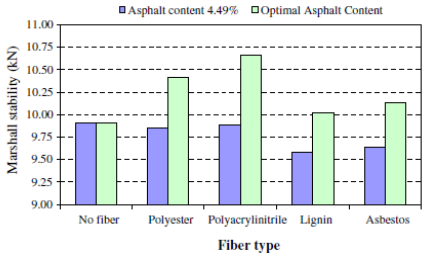


Figura 20. Estabilidad Marshall vs. Tipo fibra. Huaxin Chen, 2009

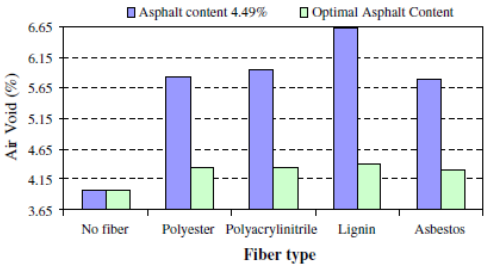


Figura 21. Relación de vacíos vs. Tipo fibras. Huaxin Chen, 2009

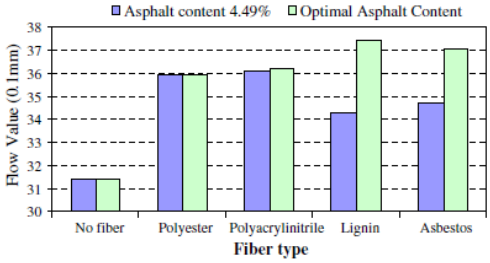


Figura 22. Flujo vs. tipo fibras. Huaxin Chen, 2009

Tabla 1. Características del poliéster. Huaxin Chen, 2009

Parámetros	BONIFIBER
Diametro de la fibra (mm)	0.020+0.0025
Longitud de la fibra (mm)	6.35+1.58
Relacion Longitud/diametro (valor medio)	318
Resistencia a la traccion (Mpa)	517 ± 34.5
Maximo esfuerzo de traccion	33 ± 9
Gravedad especifica	1.36 ± 0.04
Punto de fusion (°C)	>249

Como conclusión principal del estudio, se observó que las fibras empleadas favorecen las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas y que un porcentaje aproximado a utilizar puede ser el 0.35%.

- Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. Journal Fuel. Huaxin Chen y Qinwu Xu.

  Investigación experimental realizada en China y que consistió en estudiar el comportamiento del asfalto al adicionar diferentes tipos de poliéster con ensayos en reómetro de corte dinámico - DSR. Las pruebas realizadas consistieron en establecer el comportamiento a fatiga y deformación plástica en función del parámetro G* y ángulo de fase. Entre los resultados obtenidos se resalta que las fibras utilizadas reducen la deformación plástica y fatiga del asfalto (Tabla N. 2). [17]

Tabla 2. Resultados de G* y ángulo fase de asfaltos modificados con fibras. Huaxin Chen and Qinwu Xu, 2010

DSR test results of fiber modified asphalts.

Fiber modified asphalt	Temperature (°C)	G^* (kPa)	Phase angle δ (°)	$G^*/\sin\delta$ (kPa)
No fiber	82	0.412	89.6	0.412
Polyester fiber I	82	0.945	81.9	0.955
Polyester fiber II	82	1.380	80.6	1.399
Polyacrylonitrile fiber	82	0.952	82.2	0.961
Lignin fiber	82	2.460	69.5	2.626
Asbestos fiber	82	0.591	87.2	0.592

Se resalta que modificar con fibras de poliéster de diferentes características el asfalto del estudio, tiene como resultado un incremento en su módulo complejo entre 129% y 235% y un descenso en el ángulo de fase, cuyo resultado es una disminución en la deformación plástica y fatiga.

- Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixture. International Journal of fatigue. Qunshan Ye, Shaopeng Wub, Ning Li.

  Investigación desarrollada en China por las Universidades de Changsha y Wuhan, cuyo objetivo principal fue establecer la influencia de fibras de poliéster, celulosa y mineral en mezclas asfálticas. Los ensayos realizados fueron módulo dinámico y comportamiento a fatiga. Entre los resultados obtenidos se resalta que el módulo dinámico de los materiales modificados con fibras, se reduce levemente

irrelevantemente del tipo de fibra utilizada y frecuencia de aplicación de las cargas (Figura 23), mientras que los parámetros de fatiga se ven disminuidas (Figura 24). Estos resultados manifiestan que las fibras favorecen el comportamiento a fatiga de las mezclas, mientras que la resistencia se ve levemente afectada. Es importante resaltar que las fibras de poliéster son las que presentan un mejor comportamiento a la fatiga, seguidas de las fibras minerales y por último las de celulosa. Las características de las fibras utilizadas, aparecen en la tabla N. 3. [18]

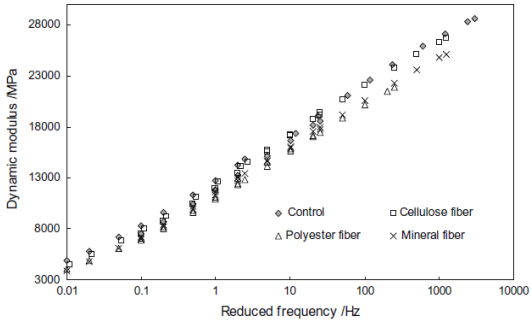


Figura 23. Módulo dinámico vs tipo fibras. Qunshan Ye, 2009

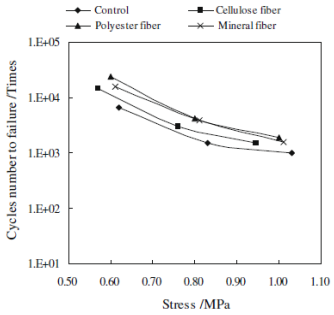


Figura 24. Parámetro de fatiga vs. Tipo fibra. Qunshan Ye, 2009

Tabla 3. Características de las fibras empeladas en la investigación. Qunshan Ye, 2009

Fiber types	Length (mm)	Diameter (mm)	Bulk specific gravity (g/cm^3)	Melting point (°C)	Tension strength (MPa)
Cellulose fiber	1.1	0.045	0.025–0.03	>200	–
Polyester fiber	6.0	0.02	1.32–1.40	248	520
Mineral fiber	6.0	0.005	2.7 ± 0.25	1500	>1000

- Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material. Journal Construction and Building Materials. Fang Xu , Mingkai Zhou , Jianping Chen , Shaoqin Ruan.

  Estudio desarrollado en China por la Universidad de Wuhan y cuyo objetivo principal fue establecer el comportamiento a flexión de concretos reforzados con fibras de poliéster y SBR latex. Las características de las fibras de poliéster fueron: longitud 12 mm, diámetro 0.014 mm, densidad 1.36 kg/m3, punto fusión 520 °C y resistencia a la tensión 540 MPa. El estudio consistió en introducir fibras de poliéster entre 0.08% y 0.16% con respecto al peso de la mezcla de concreto hidráulico y ensayarlas a flexión. Los resultados de la investigación se observan en la tabla N. 4, donde se evidencia un incremento de la resistencia a flexión y un decremento de la resistencia a la compresión, irrelevantemente el porcentaje utilizado. Así mismo, este comportamiento se da para los dos periodos de curado utilizados en la investigación (7 y 28 días). [19].

  Los resultados obtenidos en la investigación manifiestan que los valores máximos de flexión encontrados para los dos periodos de curado fueron en 0.14%y 0.16% de adición de fibras y el incremento de resistencia entre 6% y 17%. Para la resistencia a la compresión simple a 7 y 28 días de curado, todos los porcentajes presentaron descenso en la resistencia y su magnitud oscilo entre el 1% y 13%.

Tabla 4. Comportamiento a flexión y compresión de concreto reforzado con fibras de poliéster. Fang Xu et al, 2014

The influence of polyester fiber content on the strength properties of FPMC.

Sample	Fiber volume content (%)	7 d strength (MPa)			28 d strength (MPa)		
		Flexural strength/σ_f	Compressive strength/σ_c	σ_f/σ_c	Flexural strength/σ_f	Compressive strength/σ_c	σ_f/σ_c
90-S-00	0	4.43	32.3	0.137	5.52	40.4	0.137
90-S-08	0.08	4.57	31.4	0.146	5.60	39.7	0.141
90-S-10	0.10	4.60	31.9	0.144	5.79	38.5	0.150
90-S-12	0.12	4.86	31.1	0.156	5.98	39.2	0.153
90-S-14	0.14	5.20	30.0	0.173	6.70	37.8	0.177
90-S-16	0.16	4.92	28.5	0.173	6.06	38.4	0.158

- The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. Journal composites: Part B. Fang Xu, Osman Simsek, Mustafa Çullu, Gökhan Durmus, Ömer Can.

  Estudio desarrollado en Turquía por las Universidades de Agumushane y Gazi y cuyo objetivo principal fue establecer el efecto del reforzamiento de fibras sintéticas y metálicas en las propiedades de un concreto. Las fibras utilizadas en la investigación fueron de poliéster, polipropileno y metálicas y sus características aparecen en la tabla N. 5.

Tabla 5. Características fibras de refuerzo en mezcla de concreto. Fang Xu et al, 2014

Fibers properties.

Fibers properties	PY	PP	S
Length (mm)	30	30	30
Width (mm)	1	1	–
Thickness (mm)	0.6	0.35	–
Diameter (mm)	–	–	0.9
Specific gravity (g/cm^3)	1.36	0.95	7.87
Tensile strength (MPa)	400–800	600–750	~1100
Young's modulus (MPa)	17237	3800	200000
The final elongation (%)	>8	10	<2
Ignition temperatures (°C)	537	537.78	–
Melting, oxidation and deterioration temperature (°C)	253	180	800
According to ASTM D 570 Water absorption (% – weight basis)	0.4	0.01	0

Los resultados de la investigación, ponen de manifiesto que existe un descenso de la resistencia a la compresión al introducir fibras de poliéster en la mezcla, irrelevantemente el tiempo de curado (2% y 8%). De otra parte, para el caso de las fibras de polipropileno y metálicas, la resistencia se incrementa entre el 3% y 10%. (Figura 25). La respuesta del módulo de elasticidad dinámico del concreto decrece con los ciclos de carga y al adicionar fibras, sin importar su origen. (Figura 26) [20].

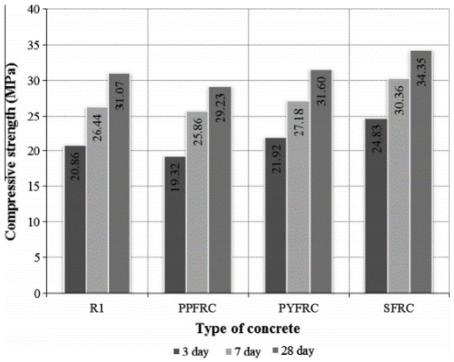


Figura 25. Resistencia compresión Vs. Tipo fibras y periodos de curado. Fang Xu et al, 2014

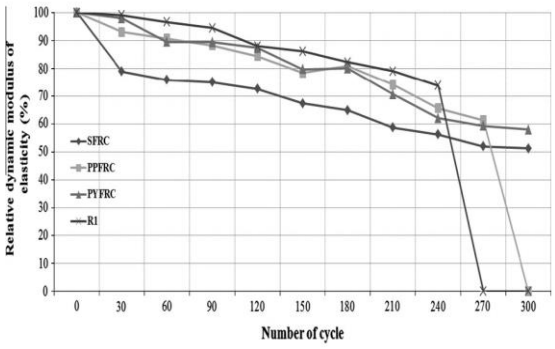


Figura 26. Módulo dinámico de elasticidad con respecto tipo fibra y ciclos de carga. Fang Xu et al, 2014

Como resultado general, se observa que las fibras de poliéster generan en las mezclas asfálticas incrementos en sus propiedades mecánicas y dinámicas, ya sea modificando la mezcla o el asfalto. Estos resultados ponen de manifiesto los beneficios de adicionar estas fibras. De otra parte, los resultados obtenidos en las mezclas de concreto hidráulicos no son concluyentes sobre sus efectos reales, ya que existen investigaciones que obtienen resultados positivos y otras donde se evidencia descensos leves en sus propiedades. Sin embargo, se resalta que son más los resultados positivos.

3.2 Fibras de Polipropileno

El polipropileno es un termoplástico que se obtiene de la polimerización del propileno, que es un derivado del petróleo. Existen tres subgrupos de clasificación (Homopolímero, copolímero y copolímero de alta densidad). Estos materiales poseen características tales como su alta resistencia a disolventes, fácil de moldear, alta resistencia a la fractura, estabilidad térmica y propiedades termoplásticas. El efecto en las mezclas de concreto hidráulico y asfalto, radica principalmente en la creación de micro y macroestructuras, las cuales dan como resultado un incremento en las propiedades mecánicas y dinámicas de las mezclas. Estudios realizados han establecido que existe una mejora en la fatiga y un incremento en la resistencia.

Dentro de los estudios desarrollados nacional e internacionalmente, se pueden enumerar los siguientes:

- Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. International Journal of fatigue. Arthur Medeiros, Xiaoxin Zhang, Gonzalo Ruiz, Rena C. Yu, Marta de Souza Lima Velasco.

  Estudio desarrollado por las Universidades de Castilla-La Mancha y Rio de Janeiro (España y Brasil), cuyo objetivo principal fue establecer el efecto a fatiga de mezclas de concreto hidráulico al adicionarles fibras de polipropileno (longitud 40 mm, diámetro de 0.5 a 1.3 mm y densidad 5kg/m3) y fibras metálicas (longitud 35 mm, diámetro de 0.55 mm y densidad de 50 kg/m3). Para la investigación se establecieron tres tipos diferentes de concreto hidráulico (sin fibras, con polipropileno y con fibras metálicas) y se ejecutaron ensayos a fatiga mediante flexotracción. Los resultados principales de la investigación aparecen en las figuras 27, 28, 29 y 30 y las características de resistencia de los concretos se observan en la tabla N. 6.

  De los resultados se puede evidenciar, que la resistencia a fatiga de los concretos modificados con polipropileno aumenta significativamente, sin importar la frecuencia. Dichos aumentos son mayores a frecuencias bajas o de flujo vehicular lento. Así mismo, la resistencia máxima a la compresión disminuye levemente. Sin embargo es importante resaltar que los niveles de deformación a la cual ocurre (carga máxima) son mayores que el material sin modificar, lo que favorece el estado de flexión del material y ayuda a incrementar su módulo [21]. Finalmente, el estudio establece un incremento del 15% a los 28 días en la resistencia del concreto al adicionar fibras de polipropileno y un 12% a los 365 días.

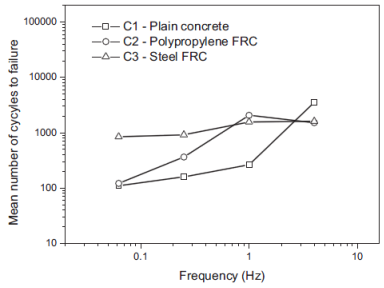


Figura 27. Comportamiento a fatiga de concretos. Medeiros et al, 2015

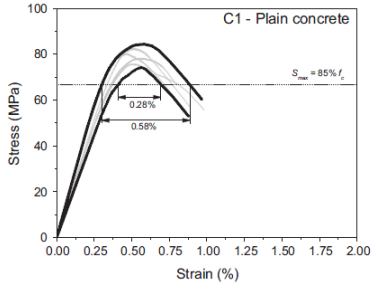


Figura 28. Resistencia concreto sin modificar. Medeiros et al, 2015

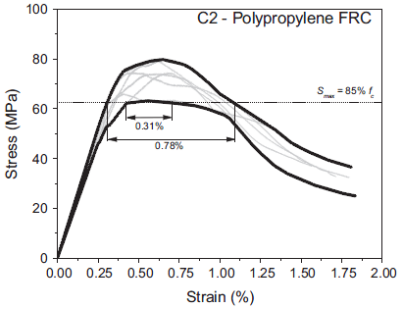


Figura 29. Resistencia concreto con fibras de polipropileno. Medeiros et al, 2015

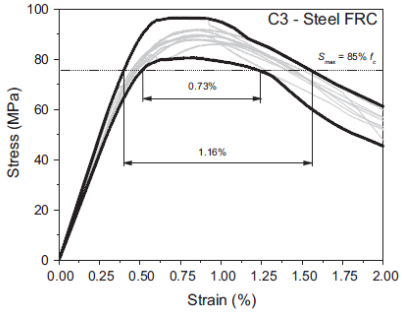


Figura 30. Resistencia concreto con fibras metálicas. Medeiros et al, 2015

Tabla 6. Características del concreto con y sin fibras de polipropileno. Medeiros et al, 2015

Concrete		f_c (MPa)	E (GPa)	ν
C1(plain concrete)	28 days	56 ± 2	33 ± 2	0.20 ± 0.01
	~one year	75 ± 2	34 ± 1	0.20 ± 0.01
C2 (polypropylene fiber reinforced concrete)	28 days	66 ± 2	35 ± 2	0.21 ± 0.02
	~one year	86 ± 2	41 ± 1	0.22 ± 0.01
C3 (steel fiber reinforced concrete)	28 days	67 ± 1	35 ± 1	0.21 ± 0.01
	~one year	86 ± 1	38 ± 1	0.21 ± 0.01

- Experimental study: Fiber reinforced concrete. Average residual strength (ARS), according to ASTM C 1399-7a. Technical report. Marco Carnio, Amauri Gomes and Rosa Cecche.

  En los laboratorios de mecánica y construcción de la Politécnica Universidad Católica en Brasil, se desarrolló una investigación cuyo objetivo principal era evaluar la incidencia de la adición de fibras sintéticas de polipropileno (diferentes porcentajes y longitudes) y fibras metálicas en un concreto hidráulico con diseño de módulo de rotura 4.5 MPa (Figura 31). El proceso ejecutado para establecer el comportamiento mecánico del concreto correspondió en determinar a los 28 días de curado, la resistencia a la compresión simple de concretos con y sin adición de fibras de diferente origen y módulo de rotura mediante flexión de vigas. Los resultados determinaron que la mejor respuesta se obtiene para las fibras de polipropileno FORTA 1 a porcentajes bajos (0.38%) y longitudes altas (54 mm) y que el incremento en resistencia oscila entre 72 y 81%. Se resalta que la resistencia de las fibras metálicas fue positiva, pero muy inferior a las sintéticas y adicionalmente, se presentó rotura a desplazamientos cercanos a 0.5 mm (Figura 32). [22]

Fiber	Brand	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio	Elasticity Modulus	Tensile Strength	Quantity of Fibers / Kg
F1 FORTA	FORTA FERRO	54	0.34*	158	5	620 - 758	221000
F2 FORTA	FORTA FERRO	38	0.34*	111	5	620 - 758	314770
F3 GRACE	STRUX 90/40	40	0.44*	90	9.5	620	184500
F4 EUCLID	TUF STRAND	50	0.69*	74	5	600 - 650	58000
F5 BEKAERT	DRAMIX	60	0.75	80	210	1050	4600
F6 BEKAERT	DRAMIX	60	0.90	65	210	1000	3200
F7 BEKAERT	DRAMIX	60	0.55	65	210	1100	14500
F8** BARCHIP	MACRO	42	N/A	N/A	8.2	550	50000
F9** BARCHIP	SHOGUN	48	N/A	N/A	10	550	35000
F10**	ENDURO 600	50	0.70*	71	N/A	420	17000

Figura 31. Características de las fibras sintéticas y metálicas utilizadas en la investigación. Carnio et al, 2009.

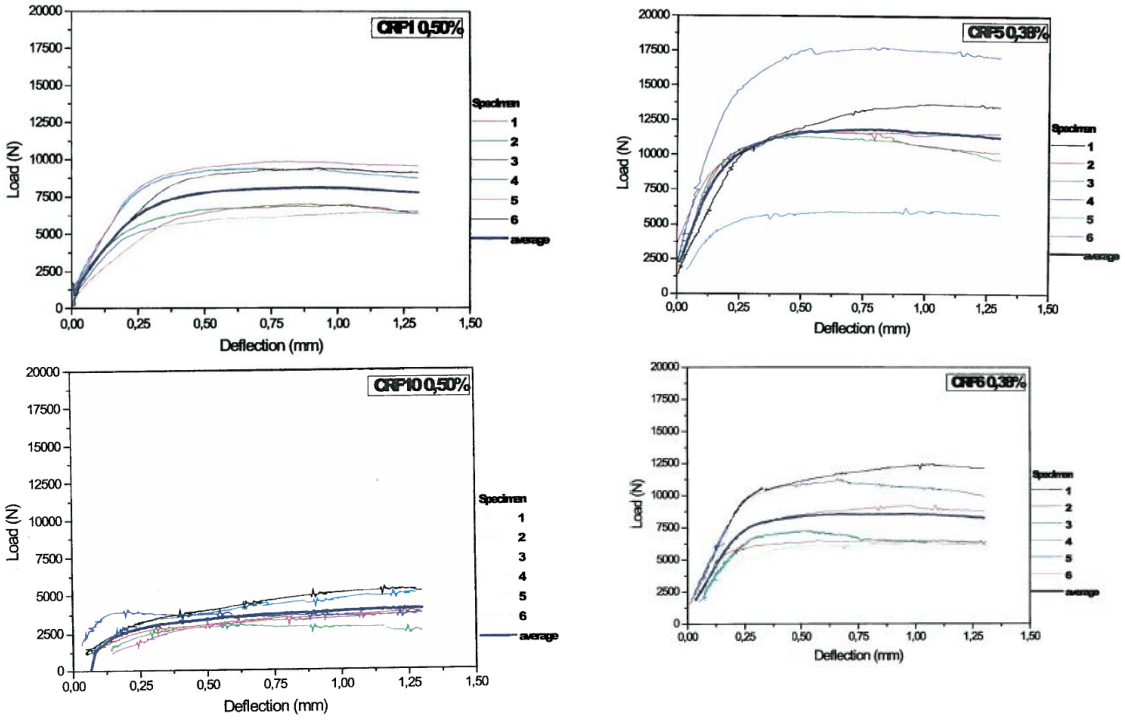


Figura 32. Comportamiento a compresión simple de concretos con fibras sintéticas a diferentes porcentajes y longitudes. Carnio et al, 2009

- Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. Journal Construction and Building Materials. A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino.

  Estudio desarrollado en Italia y San Marino por las Universidades de San Marino y Modena, cuyo objetivo principal fue establecer el efecto de fibras de polipropileno en la resistencia de la vía en concreto hidráulico que une Civitanova y Foligno. Las características de las fibras utilizadas en la construcción de la vía fueron de 39 mm de longitud y 0.78 mm de diámetro. El comportamiento mecánico y acústico durante el tiempo de seguimiento de la vía está en la Tabla N. 7. De los resultados obtenidos, los investigadores concluyeron que existe una reducción de los decibelios y la resistencia permanece constante con el tráfico (Figura 33) [23].

Tabla 7.Características de las fibras de polipropileno. Nobiili et al, 2014

Sample	28 days ultimate load (kN)	Ultimate strength (MPa)	Propagation time of acoustic waves (μs)
1A	1003	38.0	66
1B	988	39.5	69
2A	1064	37.5	55
2B	1100	38.5	54
3A	1045	37.5	66
3B	1014	38.5	66

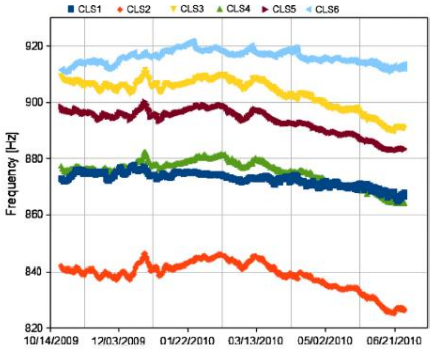


Figura 33.Respuesta acústica de la vía con diferentes materiales. Nobiili et al, 2014

- Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras, Revista ciencia e ingeniería neogranadina. Oscar Javier Reyes Ortiz, Juan Ricardo Troncoso Rivera y Fredy Alberto Reyes Lizcano

  Estudio desarrollado por la Universidad Militar Nueva Granada y cuyo objetivo principal era establecer la influencia de fibras de polipropileno en el comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica cerrada. Para el estudio se fabricaron probetas Marshall a diferentes niveles de compactación (50 y 75 golpes por cara) y se introdujeron fibra de polipropileno a diferentes porcentajes (0 a 0.75 %) [24]. Los ensayos realizados para caracterizar las mezclas fueron módulo resiliente y ahuellamiento. En las figuras 34 y 35, se observa el efecto de las fibras en la respuesta dinámica de los materiales y se resalta que para un 0.6% de adición, irrelevantemente la frecuencia del ensayo, el módulo resiliente se incrementa hasta un 100%. Referente a la deformación plástica, los mejores resultados se observan para la adición de fibras

entre 0.6% y 0.75%. Se resalta, que para valores superiores a 0.75% de adición, la tendencia de las curvas es desfavorable.

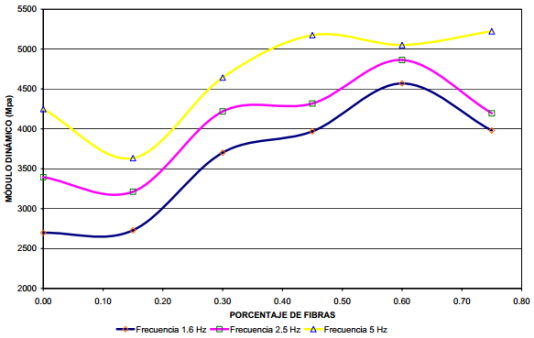


Figura 34. Módulo resiliente vs. % fibras. Reyes et al, 2005

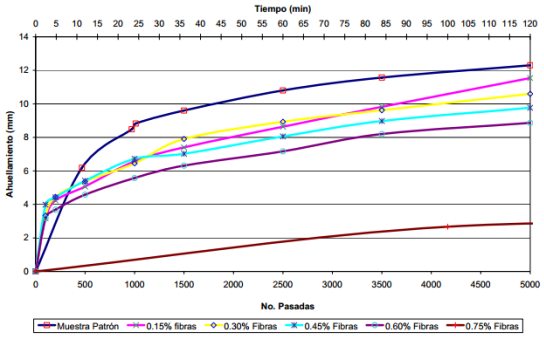


Figura 35. Deformación plástica vs. % fibra. Reyes et al, 2005

- Strengthening of hot-mix asphalt mixtures reinforced by polypropylene-impregnated multifilament glass fibres and scraps. Journal Construction and Building Materials. Pyeong Jun Yoo , Tae Woo Kim

  Estudio desarrollado en Corea por la Universidad de Korea y cuya finalidad era establecer el efecto de fibras de polipropileno y vidrio en el comportamiento de mezclas asfálticas por vía seca (Figura 36). Las características de la fibra aparecen en la tabla N. 8 y los resultados de resistencia a la tensión indirecta y deformación plástica aparecen en las figuras 37 y 38. De los resultados se puede establecer que la adición de fibras por vía seca, mejora la resistencia a la tracción indirecta y disminuye la deformación plástica [25].

Figura 36. Mezcla de agregado y fibras por vía seca Pyeong et al, 2015

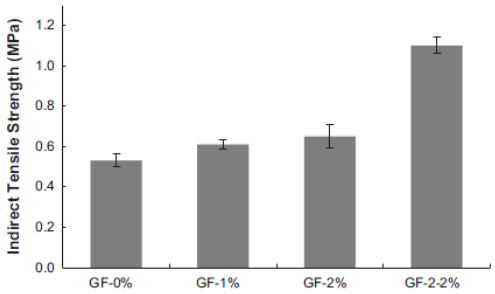


Figura 37. RTI vs fibras de polipropileno. Pyeong et al, 2015

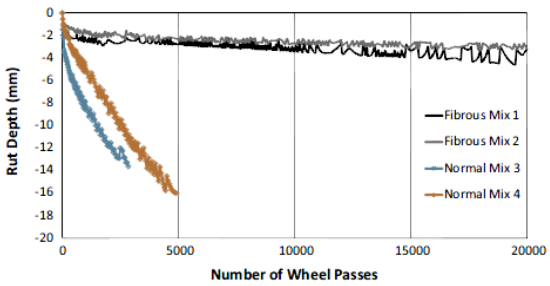


Figura 38. Ahuellamiento vs ciclos de carga. Pyeong et al, 2015

Las resistencias a la tracción indirecta obtenidas al adicionar fibras de polipropileno entre 1% y 2.2%, muestran incrementos leves para los porcentajes de 1% y 2%, mientras que para el caso del 2.2% el aumento es casi del 100%. Con respecto al efecto en la deformación permanente de las mezclas asfálticas, adicionar fibras genera un beneficio significativo, pues reduce elevadamente las deformaciones y es capaz de alcanzar ciclos elevados (20.000) sin presentar ahuellamiento.

Tabla 8. Propiedades de las fibras de polipropileno Pyeong et al, 2015

Physical properties	Characteristic value
Density (g/cm^3)	2.55
Tensile strength (MPa)	3400
Elongation (%)	4.5–5.0
Number of filaments	800–1000
Length (mm)	10–12

Como conclusión, el comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas al adicionar fibras de polipropileno es positivo, pues incrementa su módulo resiliente, disminuye la deformación plástica y mejora la fatiga. De los estudios se puede resaltar que el porcentaje más favorable está cercano al 0.6%. Los resultados observados en los concretos hidráulicos muestran que la deformación a la carga máxima en los ensayos de compresión, aumenta al adicionar fibras de polipropileno, lo cual beneficia el estado de flexión del concreto. Así mismo, se evidencio posibles reducciones acústicas en estudios a escala real. Por último, algunos resultados muestran descensos en la resistencia a la compresión simple, pero sus magnitudes son pequeñas.

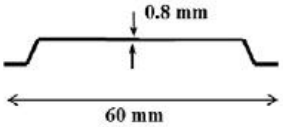
3.3 Fibras de Metálicas

Las fibras metálicas de diferentes características y origen, tanto de procesos industriales o residuo de los mismos, han sido empleadas para mejorar el comportamiento del concreto, especialmente sus propiedades de flexión y compresión.

Entre los estudios recientes se pueden enunciar:

- Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. Journal Construction and Building Materials. M. Madhkhan, R. Azizkhani, M.E. Torki Harchegani

  Estudio realizado en Irán y cuyo objetivo principal fue establecer la incidencia de adicionar fibras metálicas en el concreto hidráulico. Las características y propiedades del micro refuerzo utilizado se pueden observar en la Figura 39 [26].



Properties of the steel fibers used in the experiments.

Length (mm)	Diameter (mm)	Length to width ratio (aspect ratio)	Tensile strength (N/mm^2)	Specific volumetric mass (kg/m^3)
60	0.8	75	1000	7800

Figura 39. Micro Refuerzo del concreto. Madhkhan et al, 2012

Los ensayos planteados en la investigación fueron el módulo de rotura y la compresión simple. Los resultados de la investigación se observan en las figuras 40, 41, 42 y 43 y muestras las ventajas de utilizar el micro refuerzo [26]. Es importante resaltar que existe un incremento del 20% en la resistencia a la compresión al adicionar fibras metálicas a diferentes porcentajes. En el caso del módulo de rotura, la incidencia de las fibras es un leve descenso en su magnitud.

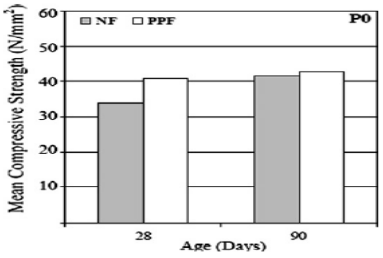


Figura 40. Resistencia compresión concreto con y sin fibra tipo P0. Madhkhan et al, 2012

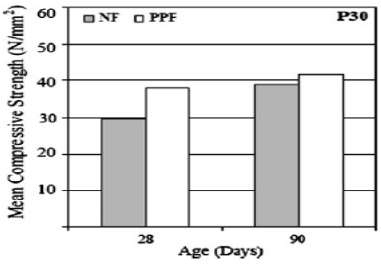


Figura 41. Resistencia compresión concreto con fibra tipo P30. Madhkhan et al, 2012

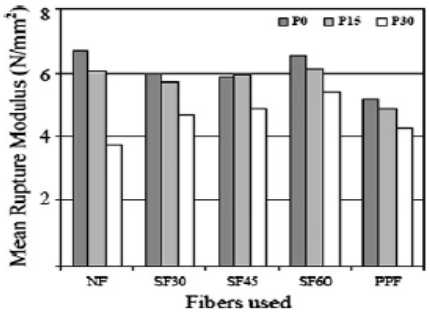


Figura 42. Resistencia módulo rotura concreto con y sin fibra tipo P0, P15 y P30. Madhkhan et al, 2012

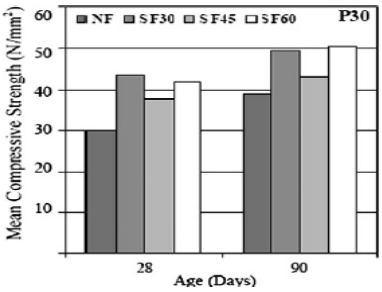


Figura 43. Resistencia compresión concreto con y sin fibra tipo P30 a diferentes dosificaciones. Madhkhan et al, 2012

- Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. Journal Engineering Structures. Angela Gaio Graeff , Kypros Pilakoutas, Kyriacos Neocleous, Maria Vania N.N. Peres.

  Estudio realizado en Inglaterra por las Universidades de Sheffield y Rio Grande do Sul de Brasil y cuyo objetivo principal fue establecer la incidencia de fibras metálicas como refuerzos en concretos para evaluar el daño a fatiga. La investigación consistió en introducir fibras de desechos de llantas y fibras metálicas como micro refuerzo. Para evaluar el comportamiento de los materiales, se realizaron los ensayos de fatiga y los resultados determinaron que la adición de fibras mejora el daño por fatiga, especialmente al permitir mayores niveles de deformación y número de ciclos para su fallo. En el caso de fibras metálicas industriales el beneficio está relacionado para grandes ciclos de carga. (Figura 44 y 45). [27].

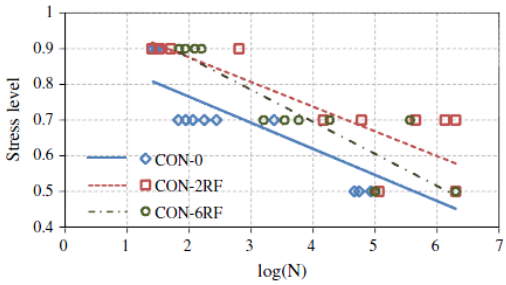


Figura 44. Refuerzo con desperdicio de llanta. Gaio et al, 2012

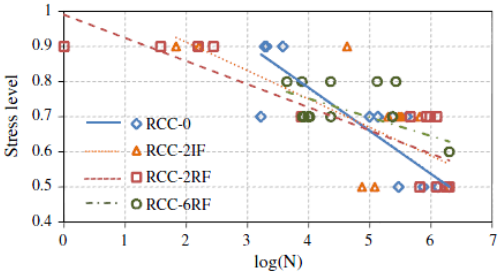


Figura 45. Refuerzo con fibras metálicas. Gaio et al, 2012

- Evaluation on the usability of structure steel fiber-reinforced bituminous hot mixtures. Journal Construction and Building Materials. Sedat Çetin.

  Estudio desarrollado en Turquía y cuya finalidad era establecer el efecto de las fibras metálicas en una mezcla asfáltica. La investigación consistió en introducir fibras largas (L-LCSS) y fibras cortas (S-LCSS) con una dosificación por peso de 0.1% y 5% respectivamente. Las probetas fueron fabricadas siguiendo la metodología Marshall y se estableció la incidencia de las fibras en la mezcla, tal como se observa en las

figuras 46, 47, 48 y 49. Los resultados obtenidos demuestran que las fibras cortas son más favorables para la densidad Bulk y las largas para el flujo, estabilidad y relación de vacíos. Sin embargo, los resultados no permiten establecer el verdadero beneficio de estas fibras en las mezclas asfálticas. [28]

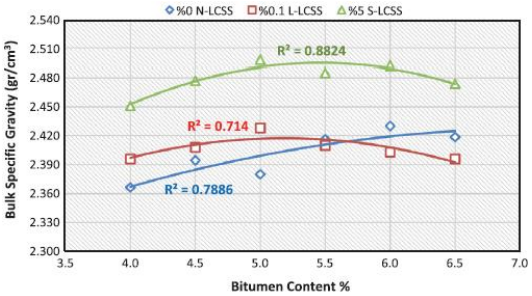


Figura 46. Densidad Bulk vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014

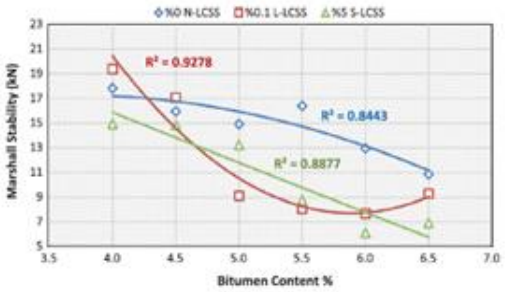


Figura 47. Estabilidad Marshall vs. Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014

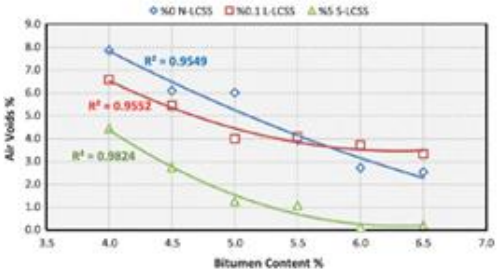


Figura 48. Relación de vacíos vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014

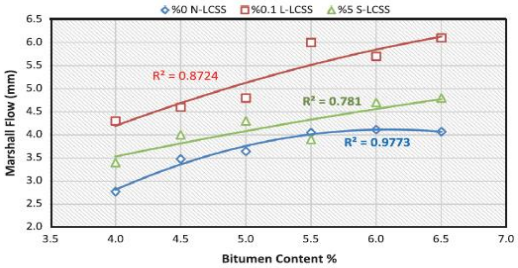


Figura 49. Flujo Marshall vs Contenido de asfalto. Sedat Çetin, 2014

3.4 Fibras de múltiples compuestos empleadas en pavimentos flexibles y rígidos

Empresas multinacionales han desarrollado y patentado múltiples productos que permiten mejorar las propiedades de las mezclas de concreto asfáltico e hidráulico, dando como resultado incrementos en su resistencia mecánica y dinámico. Entre esos productos se pueden enunciar los siguientes:

- Fibras de polipropileno Sikafiber AD

  Fibras de polipropileno denominadas microfibras debido a su tamaño, utilizada en concreto hidráulico en estado fresco y cuya función principal es evitar la fisuración por retracción térmica. Su dosificación esta entre 0.03% y 0.15% del peso de la masa de concreto. Estudios realizados por la Firma comercializadora, han podido demostrar que colocar estas fibras en el concreto permite reducir los anchos de las fisuras, la cantidad de las mismas y el agrietamiento de las losas, tal como se observa en la tabla N. 9.

Tabla 9. Comportamiento a las fisuras de un concreto con fibras Sikafiber AD y malla electrosoldada. Toxement, 2011

Tipo de Especimen	Área total de agrietamiento	Ancho de fisura promedio	Número total de fisuras	% total de área de agrietamiento con respecto al especimen de referencia
Patrón	994	0.10	166	100
Malla	824	0.11	102	83
Microfibra A (0,45 k/gm³)	108	0.09	21	11
Microfibra A (0,9 k/gm³)	34	0.09	9	3
Microfibra B (0,60 k/gm³)	59	0.08	20	6
Microfibra B (0,9/ k/gm³)	4	0.08	2	0

*todas las medidas en mm.

- Fibras Sikafiber®600

  Las fibras metálicas o de polipropileno Sikafiber®600 (Figura 50), denominadas macrofibras por su tamaño, tienen como objetivo principal ganar tenacidad en la mezcla de concreto hidráulico, lo cual ayuda a soportar mayor cantidad de cargas antes de su falla y tener resistencia residual una vez aparecen fisuras (Figura 51). Aunque dentro de la ficha técnica no se especifica incrementos en su resistencia a la flexión y compresión, varias investigaciones han podido demostrar su bondad ante estas propiedades. [29]

Figura 50. Refuerzos de macrofibras Sikafiber®600. Sika, 2010

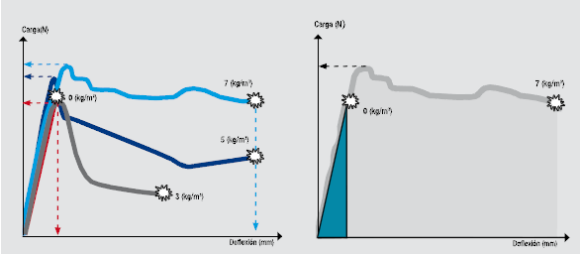


Figura 51. Resistencia del concreto con macrofibras y sin fibras. Sika, 2010

- Fibras TOC FIBRA 500

  La fibra TOC FIBRA 500, denominada una macro fibra de polipropileno empleada principalmente como refuerzo secundario para concretos y su dosificación en peso es de 1 Kg/m^3 de concreto o mortero preparado. Los efectos de esta fibra son aumentar la resistencia a contracción térmica, lo que quiere decir que aumenta la resistencia en las primeras 24 horas del concreto, lo que ayuda a disminuir de forma considerable la aparición de grieta por contracción plástica, aunque su función principal es reducir las

grietas a edades tempranas, también actúa en estado endurecido, ayudando a reducir la longitud de las grietas. Las principales propiedades que poseen estas fibras, son que el refuerzo que estas proporcionan se hace multidireccional, lo cual forma una malla que distribuye de mejor forma los esfuerzos [30].

- Fibras TUF – STAND SF

  Fibras metálicas utilizadas para remplazar las malla electro soldadas, lo cual significa que actúan como refuerzo secundario para el concreto, ayudando así a reducir la formación por retracción plástica en el concreto y están diseñadas para proveer una resistencia a la tensión equivalente a la de los refuerzos convencionales. De otra parte, realizan un refuerzo tridimensional lo que conlleva a un incremento de la tenacidad a la flexión, la resistencia a la abrasión y al impacto. Una de las desventajas que tiene esta fibra es que para dosificaciones de 2 a 7 kg/m^3, se puede preveer una perdida en el asentamiento de 50 0 125 mm. [31].

- Fibras Durakal.

  Fibras acrílicas y cuya finalidad es crear una red tridimensional de refuerzo para carpetas asfálticas, lo cual ayuda a distribuir los esfuerzos generados por los vehículos. Estudios desarrollados por la empresa, demuestran que la tensión indirecta en probetas de mezclas SMA puede incrementarse en un 100%. [32].

- Mezclas de fibras de aramida, poliolefinas y otros orígenes

  Producto constituido por una mezcla de diferentes productos, entre los que se encuentra las fibras de aramida, polielefinas y polímeros de diferentes características, cuya dosificación permite crear un múltiple refuerzo a las mezclas asfálticas. La resistencia y geometría diferente de las fibras hace que en el proceso de fabricación de mezclas asfálticas se produzca al interior de la matriz agregado pétreo – asfalto una unión que incrementa la resistente a la cohesión, adhesión entre otras propiedades. Estudios realizados por la empresa comercializadora del producto, han podido establecer que la resistencia al cortante de las mezclas con este grupo de fibras se ve incrementada en un 20% aproximadamente. (Figura 52). Así mismo, la resistencia a la tracción máxima aumenta en un 33% (Figura 53). [33]

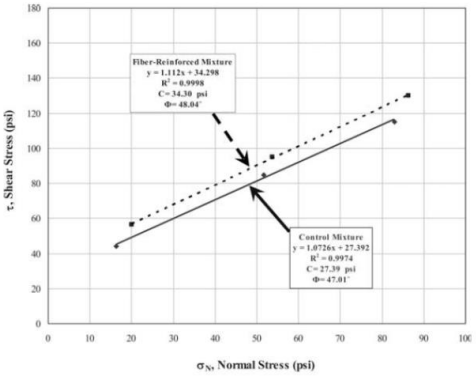


Figura 52. Comportamiento de mezclas con y si aramida y otros productos. Kamil et al, 2010

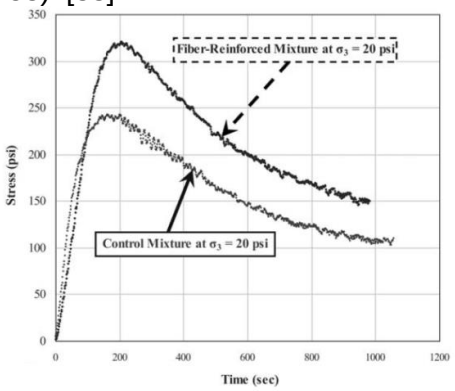


Figura 53. R. tracción indirecta de mezclas asfálticas con y si aramida y otros productos. Kamil et al, 2010

En resumen, múltiples investigaciones han podido demostrar que adicionar a mezclas asfálticas o de concreto hidráulico productos tipo fibras (sintéticas o metálicas), favorecen sus propiedades mecánicas y dinámicas.

Finalmente, en la tabla N. 10 se resumen los diferentes productos encontrados y se dan algunas características de los mismos.

Tabla 10 Características de fibras, tipo pavimento y ventajas

Tipo de fibras	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Tipo pavimento	Ventajas
Poliéster	10 - 40	0.01 – 1	Flexible - Rígido	Pavimento rígido: Las fibras de poliéster en el concreto hidráulico generan enlaces entre los diferentes agregados y la apsta de cemento, que al ser sometidos a esfuerzos a tensión o compresión, ayudan a incrementar su resistencia y evitan microfisuras. Estas propiedades han sido observadas en diferentes investigaciones mediante la ejecución de ensayos de módulo de rotura y elasticidad, cuyos incrementos oscilan dentro del 1-20% (valores que dependen de las características del cemento, agregado y tiempos de curado). Pavimento flexible La adición de fibras en las mezclas asfálticas en caliente, irrelevante su tipo de granulometría, producen una unión entre la matriz agregado-asfalto, lo cual ayuda a la respuesta mecánica y dinámica de la mezcla, especialmente disminuyendo la deformación plástica, fatiga y susceptibilidad al agua. Estas ventajas del poliéster han sido observadas en ensayos a mezclas asfálticas y cuyo porcentaje de incremento oscila entre el 1-25%. (valor que depende de las características del asfalto, agregado, tipo de mezcla, temperatura de fabricación, procesos de fabricación entre otras variables). Se resalta que al tener el poliéster un punto de fusión cercano a 250°C, este no se funde en el proceso de fabricación de las mezclas.
Polipropileno	10 – 40	0.01 – 1	Flexible – Rígido	Pavimento rígido Las fibras de polipropileno generan

				adherencia entre la arena, agregado y pasta de cemento, que una vez fraguado el concreto, sirven de enlace entre las partículas e incrementa su resistencia a la flexión y compresión. Resultados obtenidos en diferentes investigaciones plantean incrementos en el módulo de rotura y compresión simple del orden de 20%. Es importante resaltar que dichos valores dependen de las características del cemento, agregado, arena y tiempos de curado. Pavimento flexible La adición de fibras de polipropileno en mezcla asfáltica en caliente, genera adhesión, cohesión y rigidez, toda vez que en el proceso de mezclado la fibra se funde (130-170°C) y une los diferentes componentes de la mezcla. La respuesta mecánica y dinámica de las mezclas se puede ver influenciada en un incremento del 5 al 100% (valor que depende de las características del asfalto, agregado, tipo de mezcla, temperatura de fabricación, procesos de fabricación entre otras variables).
Metálicas	30-90	0.5 – 2	Rígido	Las fibras metálicas introducidas dentro de la masa de concreto hidráulicos generan microrefuerzos, los cuales contribuyen a incrementar especialmente su resistencia a la flexión y aportan en oportunidades la resistencia a la compresión. Estas propiedades se han evidenciado en las diferentes investigaciones realizadas mediante ensayos de módulo de rotura, módulo de elasticidad y resistencia a la compresión simple, cuyos incrementos pueden llegar hasta un 35% y depende de las características del cemento, agregado y tiempos de curado.
Aramida y otras	10-40	0.01 – 1	Flexible	Las fibras de diferente origen, tamaño y geometría (aramida, polipropileno, homopolimero etc), generan en la estructura de la mezcla asfáltica en caliente múltiples enlaces, que conducen a incrementos de su rigidez, disminución en la deformación plástica y

				susceptibilidad al agua. Dichos incrementos oscilan entre 5-70%. (valor que depende de las características del asfalto, agregado, tipo de mezcla, temperatura de fabricación, procesos de fabricación entre otras variables). Se resalta que al poseer la fibra diferentes compuestos y temperaturas de fusión, en los procesos de fabricación se generan enlaces de adherencia, microrefuerzo entre otros.

4. Descripción de actividades

Las actividades desarrolladas en la primera, segunda, tercera y cuarta etapa del convenio, correspondieron en la metodología, programa experimental, consecución, caracterización de materiales, estudio del comportamiento mecánico y desempeño de materiales, análisis de resultados, planteamiento de recomendaciones y conclusiones y elaboración del informe final y divulgación de resultados, las cuales se enuncian a continuación:

4.1 Metodología Experimental

Esta fase del convenio consistió en establecer las estrategias necesarias al interior de la Universidad para optimizar los recursos de laboratorio y personal calificado, de tal manera que se pudiera lograr el programa experimental planteado, tanto para los ensayos de mezclas asfálticas como de mezclas de concreto hidráulico. La metodología se fundamentó en la cantidad de ensayos a ejecutar, periodos de curado y en especial los referentes a la evaluación dinámica de las mezclas asfálticas.

Referente al recurso de infraestructura en laboratorios y equipos que tiene la Universidad, se estableció el uso de los siguientes recursos para dar cumplimiento al convenio:

- Laboratorio de Pavimentos I
  - ✓ Equipo de penetración de asfalto
  - ✓ Equipo de punto de ablandamiento o anillo y bola
  - ✓ Viscosímetro Saybol-Furol
  - ✓ Baños termoregulados
  - ✓ Equipo Copa abierta de Cleveland
  - ✓ Basculas electrónicas de precisión entre 0.1 y 0.001 gramos
  - ✓ Prensa de compresión a velocidad controlada
  - ✓ Hornos de temperatura controlada y circulación de aire
  - ✓ Equipos de compactación giratoria
  - ✓ Equipo de compactación Marshall
  - ✓ Equipo de compactación por rodillo
  - ✓ Mezcladora de agregado – Ligante asfáltico
  - ✓ Equipo de deformación plástica
  - ✓ Cortadora de muestras para mezclas asfálticas
  - ✓ Equipo RFTOT
  - ✓ Equipo prensa dinámica, con sistema hidráulico para ensayos de módulo resiliente, dinámico, creep, fatiga, resistencia a la compresión, con cámara de control de temperatura.
  - ✓ Bancos de fatiga con cámara de control de temperatura para ensayos a flexotracción de mezclas asfálticas bajo desplazamiento o deformación controlada.
  - ✓ Reómetro de corte dinámico
  - ✓ Prensa multiusos para ensayos de resistencia a la compresión.
  - ✓ Balanzas de precisión de 0.1 a 0.001 gramos

- Laboratorio de Resistencia de materiales
  - ✓ Prensa con dispositivos para la ejecución de ensayos de compresión simple, diametral, módulo de elasticidad, módulo rotura.
  - ✓ Máquina de los Ángeles

- ✓ Basculas electrónicas de precisión entre 0.1 y 0.001 gramos
- ✓ Prensa de compresión a velocidad controlada
- ✓ Hornos de temperatura controlada y circulación de aire
- ✓ Baños termoregulados
- ✓ Aparato permeabilidad Blaine
- ✓ Aparato de Vicat
- ✓ Cono de Abrams
- ✓ Autoclave
- ✓ Mezcladora de concreto hidráulico
- ✓ Moldes para fabricación de cilindros y vigas prismáticas.

4.2 Programa experimental:

La etapa del convenio denominada Programa Experimental, correspondió en establecer los ensayos a ejecutar dentro de la investigación, iniciando con la caracterización de los materiales (agregado grueso y fino, asfalto, cemento), seguido de los diseños de mezclas asfálticas y concreto hidráulico con y sin fibras. Por último, se desarrolló un plan de trabajo entre marzo y agosto para los diferentes ensayos mecánicos y dinámicos de las mezclas asfálticas y periodos de curado del concreto hidráulico. El programa planteo ejecutar la caracterización de los materiales y diseño de mezclas entre marzo y abril. El desarrollo de los ensayos dinámicos y la evaluación de los diferentes periodos de curado del concreto hidráulico entre mayo y agosto. Por último, entre septiembre y noviembre construir el informe final con sus respectivas conclusiones y recomendaciones y realizar la divulgación de los resultados.

4.3 Conformación Comité Operativo:

La Universidad Militar Nueva Granada, mediante resolución 0091 del 29 de enero de 2015, firmada por el representante legal y rector de la Universidad, designo a los ingenieros Leonardo Juan Ramírez López y Oscar Javier Reyes Ortiz como representantes de la Universidad del comité operativo y al Ingeniero Oscar Javier Reyes Ortiz, como Director del Proyecto. De otra parte, mediante memorando 20152150053923, el Director del Instituto de Desarrollo Urbano nombro a la Ingeniera Sully Magalis Rojas Bayona como su representante ante el Comité Operativo.

En la primera reunión sostenida por los integrantes del comité operativo (2 de febrero de 2015), se estableció tener reuniones ordinarias del convenio mínimo una por mes. Sin embargo, se plantea cada 15 días, las cuales se celebraran una en las Instalaciones del IDU y la siguiente en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada.

4.4 Consecución de los materiales

Con base en los compromisos adquiridos por las partes que integran este Convenio y en reunión del comité operativo, se establecieron las resistencias de diseño del concreto hidráulico a evaluar (Mr=4.0MPa y Mr=4.5MPa), las curvas granulometrías de las mezclas asfálticas en caliente (MD12 y MS25) y las características mínimas de los materiales a utilizar en el estudio, por lo cual se procedió a seleccionar y adquirir los materiales a utilizar así:

- Caneca de 55 galones de asfalto, procedencia Barrancabermeja y con penetración 60-70.
- Agregado pétreo grueso y fino del Río Coello, ubicado en el predio Rincón de Villahermosa, Vereda Agua Blanca – Espinal. Material utilizado para fabricación de mezclas asfálticas en caliente, cuyo tamaño máximo es 25 mm para las mezclas MS25 y 12 mm para la MD12.
- Agregado pétreo grueso y fino, procedente de la Vereda Río Frío, ubicado en el municipio de Tabio. Material utilizado para fabricación de mezclas concreto hidráulico, cuyo tamaño máximo es 1 pulgada para el agregado grueso y tamiz # 4 para la arena.
- Cemento Portland Gris, Tipo I. Bulto de 50 kilos.
- Fibras Sintéticas para mezclas asfálticas en caliente y concreto hidráulico
  - Fibras de Aramid, poliolefina y polímeros de diferente origen (mezclas asfálticas en caliente MD12 y MS25).
  - Fibra polipropileno homopolimero fibrilado (mezclas asfálticas en caliente MD12 y MS25).
  - Fibra polipropileno (mezclas asfálticas en caliente MD12 y MS25).
  - Fibra polipropileno fibrilada – Macrofibra (mezclas concreto hidráulico).
- Fibras Metálicas para mezclas de concreto hidráulico
  - Fibras de acero, tipo alambre con diámetro aproximado 1.5 mm y longitud 50 mm y forma geométrica curvada en los extremos.
  - Fibra de acero, estirado en frío y tipo lámina, de longitud aproximada 50 mm y espesor 1 mm.
- Agua para la fabricación del concreto hidráulico, será potable y suministrada por el acueducto de Cajicá.

4.5 Caracterización de los materiales:

Esta etapa del proyecto, consistió en la ejecución de ensayos de laboratorio para evaluar las características mecánicas de los materiales adquiridos para la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente y de concreto hidráulicos con base en las Especificaciones Técnicas Generales de Materiales y Construcción, para Proyectos de Infraestructura Vial y de Espacio Público, para Bogotá, D.C. - IDU-ET 2011. Así mismo, se enuncian las especificaciones técnicas de las fibras usadas

4.5.1 Especificaciones técnicas fibras

Las fibras utilizadas en la investigación se pueden dividir en dos grandes grupos, de una parte las empleadas en las mezclas asfálticas en caliente que son de tipo sintéticas y las adicionadas al concreto hidráulico que son metálicas o sintéticas.

Las especificaciones técnicas de las fibras sintéticas adicionadas en las mezclas asfálticas en caliente se enuncian en la tabla N. 11 y corresponden a tres diferentes tipos de material, dadas sus características físicas, geométricas entre otras variables.

Tabla 11. Especificaciones fibras sintéticas utilizadas en las mezclas asfálticas

ESPECIFICACIONES	Unidades	FIBRA 1	FIBRA 2	FIBRA 3
Gravedad específica	-	0.92	0.91	0.91-1.44
Módulo elasticidad	GPa	9.5	No especifica	0.48-2.76
Absorción	%	Despreciable	Muy baja	Despreciable
Longitud	mm	50	12	19
Punto fusión	°C	160	162	100-427
Punto llama	°C	330	593	100-427

Las primeras fibras, denominadas “FIBRAS 1”, están compuestas por polipropileno y polietileno, monofilamento. Estas fibras dadas sus características, en el proceso de mezclado crean fibrilación, lo que genera mayor cohesión y resistencia en la mezcla. En la figura 54, se observa las fibras especificadas.

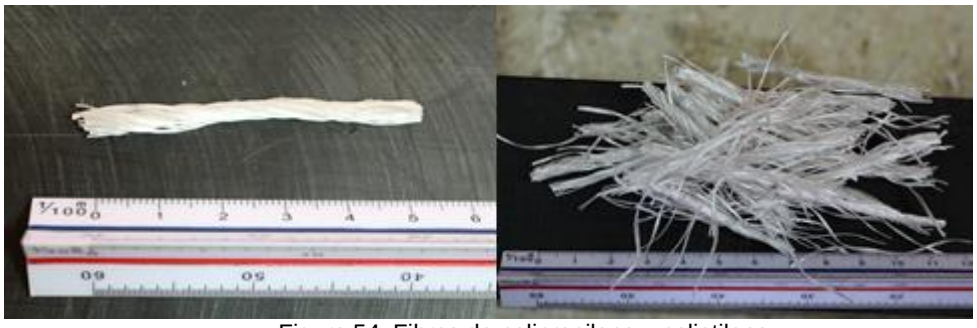


Figura 54. Fibras de polipropileno y polietileno.

Las segundas fibras, denominadas “FIBRAS 2”, cuya composición es polipropileno homopolímero virgen, sin materiales de oleofina y multifilamento, se observan en la figura 55. Las características de estas fibras producen en la mezcla asfáltica mayor adherencia y cohesión entre las partículas, lo cual induce a mayor rigidez y menor susceptibilidad al agua.

Figura 55. Fibras de polipropileno homopolimero virgen, sin materiales de oleofina y multifilamento.

Las terceras fibras, denominadas “FIBRAS 3”, están compuestas por aramida, poliolefina y otros polímeros, cuyas proporciones, características geométricas y dimensiones, crean cohesión, tenacidad y durabilidad a la mezcla asfáltica. En la figura 56, se observa las fibras utilizadas en la investigación.

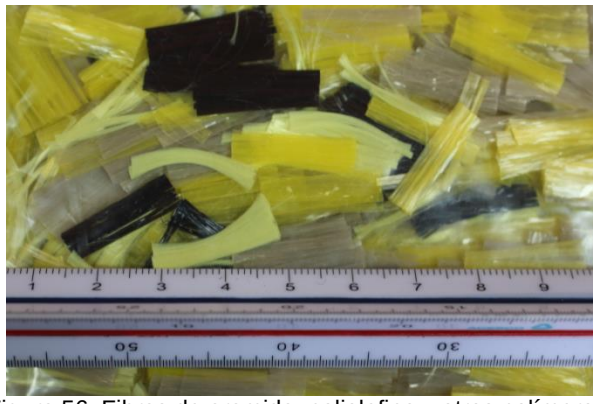


Figura 56. Fibras de aramida, poliolefina y otros polímeros**.**

En las mezclas de concreto hidráulico se utilizaron tres tipos diferentes de fibras, dos metálicas y una sintética. Las especificaciones técnicas de las fibras se enuncian en la tabla N. 12 y corresponden a tres diferentes tipos de material.

Tabla 12. Especificaciones fibras sintéticas y metálicas utilizadas en las mezclas de concreto hidráulico

ESPECIFICACIONES	Unidades	FIBRA 1	FIBRA 2	FIBRA 3
Gravedad específica	-	7.85	7.85	0.95
Módulo elasticidad	GPa	160-200	160-200	5
Absorción	%	Nulo	Nulo	Nulo
Longitud	mm	50	50	50

Las primeras fibras, que serán denominadas “FIBRAS 1”, están compuestas por acero y su forma geométrica es cilíndrica y curvada en sus extremos. Estas fibras sirven como refuerzo secundario en las losas de concreto. En la Figura 57, se observa las fibras especificadas.

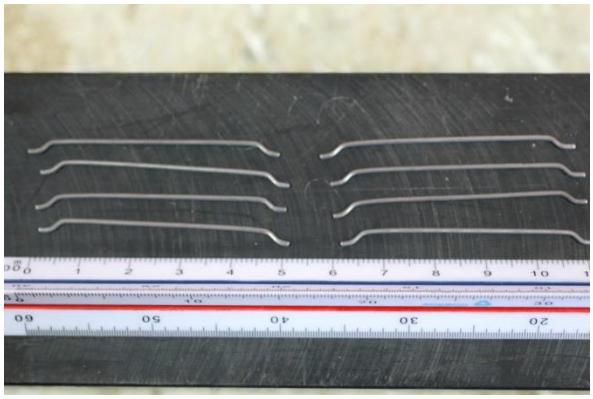


Figura 57. Fibras metálicas, forma cilíndrica y curva en sus extremos.

Las segundas fibras, denominadas “FIBRAS 2”, están compuestas por filamentos de acero en forma de lámina, cuya función es servir como refuerzo secundario en el concreto. Las fibras se observan en la Figura 58.

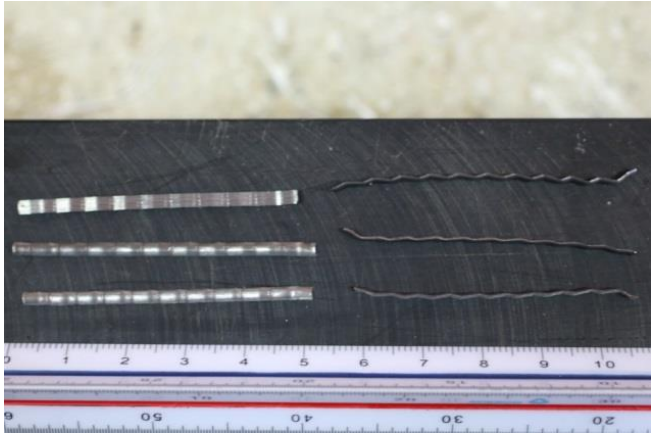


Figura 58. Fibras metálicas de acero en forma de lámina.

Las terceras fibras, denominadas “FIBRAS 3”, están compuestas por copolímeros y polipropileno virgen, cuyas características crean en el concreto un refuerzo secundario. En la figura 59, se observa las fibras utilizadas en la investigación.

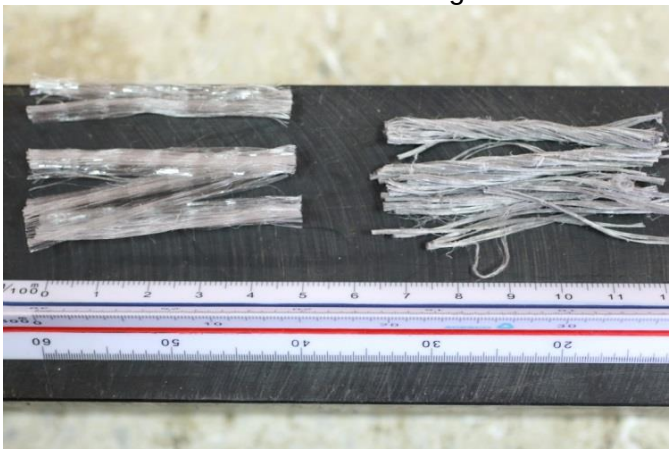


Figura 59. Fibras de copolímeros y polipropileno virgen.

4.5.2 Asfalto:

La caracterización del asfalto utilizado en el proyecto se realizó mediante las normas enunciadas en las especificaciones IDU-ET 2011, sección 200-11 y se encuentran en el Anexo N. 8. A continuación se resumen los resultados:

4.5.2.1 Punto de Ablandamiento (Ensayo anillo y bola)

La norma utilizada para determinar el punto de ablandamiento del asfalto a utilizar en el proyecto fue la INV E-712-07. El procedimiento consiste en fabricar dos especímenes o discos de asfalto, los cuales se crean vertiendo asfalto dentro de dos anillos. Una vez enfriadas las muestras, se coloca una esfera metálica encima de ellos y se introducen a un recipiente con agua destilada para ser crear un ambiente de temperatura controlada. Dicho recipiente es calentado a una tasa de 5°C / minuto y en el instante en que las esferas penetran los aros de asfalto y tocan la lámina de control, se mide la temperatura del ambiente controlado. Dicha temperatura se define como el punto de ablandamiento

(Figura 60). Los datos de los ensayos realizados aparecen en la tabla N. 13 y establecieron como temperatura del ensayo: 48.9°C.

Figura 60. Ensayo Punto de ablandamiento

Tabla 13. Resultados ensayo punto de ablandamiento

Muestra	1A	1B	2A	2B
Temperatura °C	48.7	48.8	49.1	48.9

4.5.2.2 Penetración

La norma utilizada para determinar la penetración del asfalto a utilizar en el proyecto fue la INV E-706-07. El procedimiento ejecutado fue calentar aproximadamente 500 gramos de asfalto y verterlo en un recipiente cilíndrico, teniendo cuidado de no introducirle aire ni exceder en más de 90°C la temperatura establecida en el ensayo de anillo y bola. Acto seguido se dejó enfriar la muestra y se protegió para evitar su contaminación con partículas del medio ambiente. Posteriormente, con la ayuda de un baño termoregulado, se somete y mantiene el asfalto y el recipiente a una temperatura de 25°C, para ser penetrado durante 5 segundos con una aguja que genera una carga de 100 gramos (Figura 61). Los resultados obtenidos del ensayo son los que aparecen en la tabla N. 14.

Figura 61. Equipo de penetración de asfaltos

Tabla 14. Resultados ensayo de penetración de asfaltos.

Muestra	1	2	3	4	5
Dato inicial	1256	1348	1157	1203	1289
Dato final	1877	1978	1773	1827	1916
Penetración.	621	630	616	624	627

La penetración promedio del asfalto a utilizar en el proyecto es 62.4, por ende esta categorizado como un asfalto de penetración 60/70.

4.5.2.3 Punto de llama e ignición

La norma utilizada para determinar la temperatura de ignición y llama mediante la copa abierta de Cleveland del asfalto a utilizar en el proyecto fue la INV E-709-07. El procedimiento realizado fue verter asfalto en la copa abierta de Cleveland y calentarla a una tasa constante de 15°C/minuto al inicio del ensayo y de 5°C/minuto cercano a los puntos de medición (llama e ignición). Cuando los gases generados por la temperatura obtenida del asfalto produzcan la ignición del mismo, se mide la temperatura y se determina el punto de ignición. Acto seguido, se continua calentando la muestra y se toma la temperatura cuando se cree llama en la muestra, la cual se definirá como punto de llama. Los resultados obtenidos del ensayo fueron 236°C para la ignición y 255°C para la llama. El ensayo se puede observar en la Figura 62.

Figura 62. Ensayo Punto de ignición y llama.

4.5.2.4 Ductilidad

La norma utilizada para determinar la ductilidad del asfalto a utilizar en el proyecto fue la INV E-702-07. El procedimiento consistió en fabricar una probeta en forma de corbatín e introducirlo en un recipiente lleno de agua a 25°C. Posteriormente, se estiro el espécimen a una velocidad constante de 50 mm/minuto y se estableció su longitud en 129 centímetros, valor superior al mínimo establecido en la norma (100 centímetros).

4.5.2.5 Viscosidad del asfalto

La norma utilizada para determinar la viscosidad del asfalto fue la ASTM D-4402 y los resultados obtenidos aparecen en la tabla N.15 y Figura 63. El ensayo se realizó entre 40 y 150 °C.

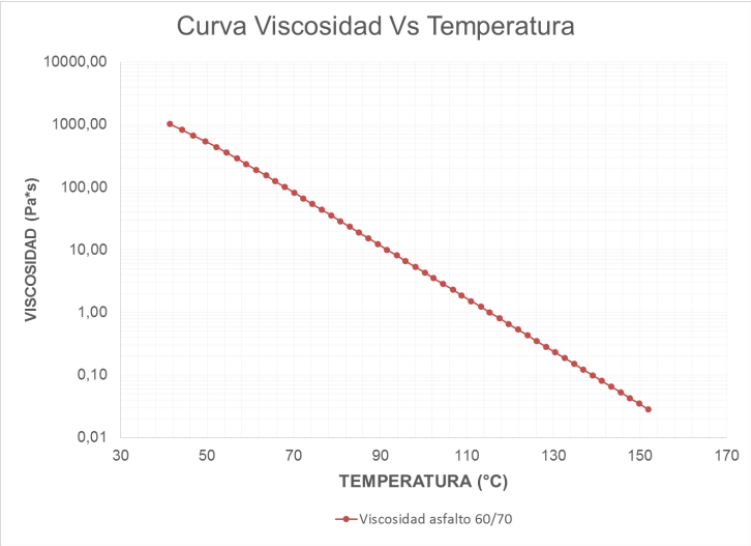


Figura 63. Curva viscosidad vs Temperatura

Tabla 15. Viscosidad vs temperatura asfalto 60/70

Temperatura (°C)	Viscosidad (Pa*s)
41.43	1020.464
59.00	234.631
80.73	28.732
100.28	4.341
119.57	0.656
134.80	0.151
139.08	0.099
149.86	0.035

4.5.2.6 Ensayos en el Reómetro de corte dinámico del asfalto

Las características dinámicas del asfalto utilizado en la investigación se realizaron en un reómetro de corte dinámico (Figura N. 64) y la respuesta de las mismas aparecen en la Figura N. 65, 66 y 67.

Figura 64. Reómetro de corte dinámico para asfaltos.

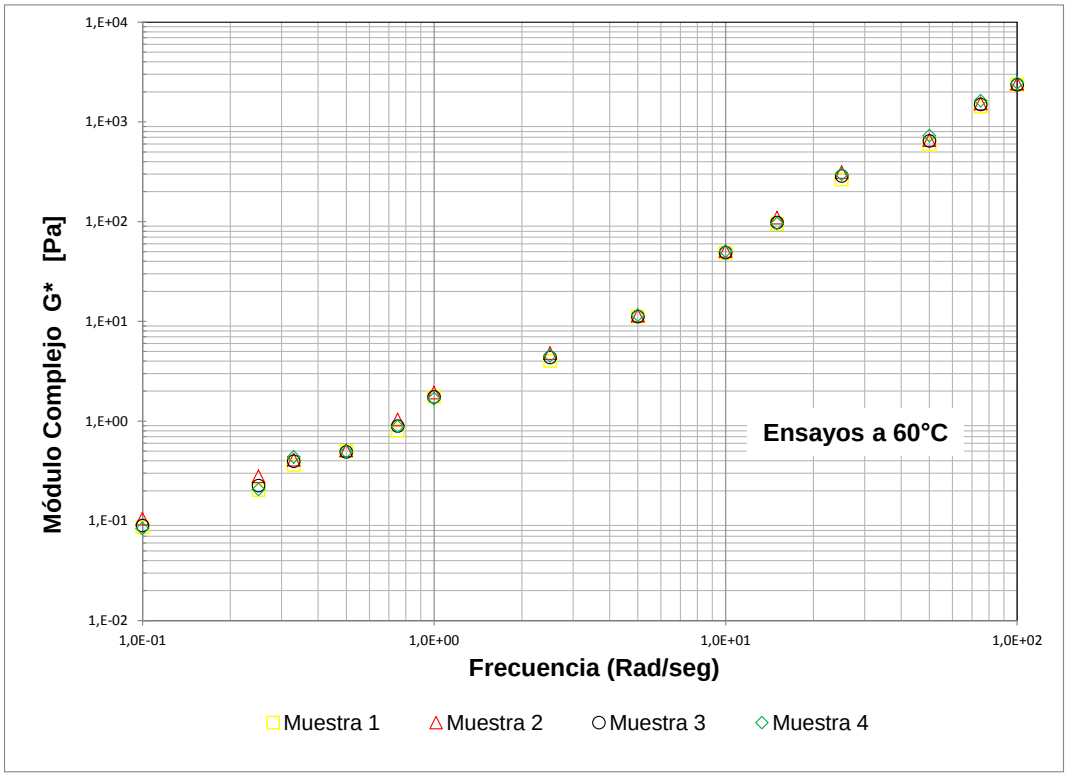


Figura 65. Curva maestra del asfalto utilizado en la investigación.

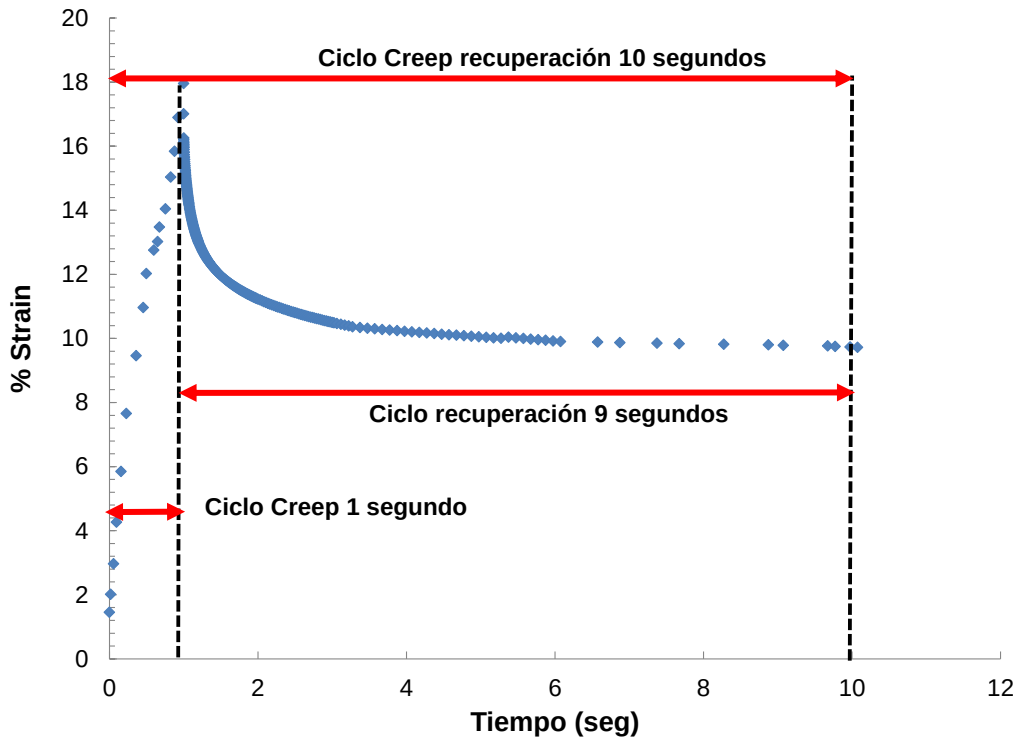


Figura 66. Curva de Creep con recuperación del asfalto 60/70, con un ciclo de carga y un esfuerzo 3200 Pa.

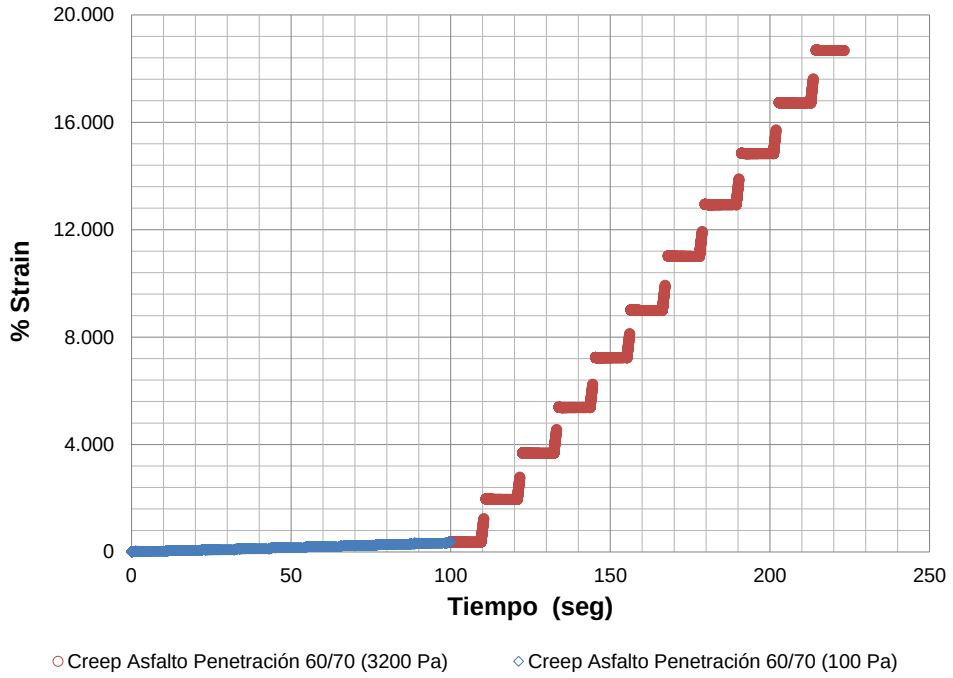


Figura 67. Curva de Creep del asfalto 60/70, con dos niveles de esfuerzo (100 y 3200 Pa) y 10 ciclos por cada nivel de esfuerzo.

4.5.3 Agregado pétreo para mezclas asfálticas:

Las características del agregado utilizado para fabricar las mezclas asfálticas, cuya procedencia es el Río Coello, departamento del Tolima, aparecen en la tabla N. 16 y el Anexo N. 9

Tabla 16. Características del agregado

Ensayo	**Norma**	**Resultado**	**Requisito Norma**
Equivalente de arena – agregado fino	INV E-133-07	59.4%	50% mínimo
Azul de metileno	INV E-235-07	0.29 g/1000g	5 máximo
Resistencia al desgaste Máquina de los Ángeles - Gradación B	INV E-218-07	24.12%	35% máximo
Gravedad especifica Bulk del agregado	INV E-222-07	2.494	
Gravedad especifica Bulk sss del agregado	INV E-222-07	2.549	
Gravedad especifica aparente del agregado	INV E-222-07	2.64	
Absorción del agregado	INV E-222-07	2.2	
Porcentaje de caras fracturadas (1 cara / 2 caras)	INV E-227-07	92.2 / 92.6	Mínimo 75 / 50
Índice de Aplanamiento	INV E-230-07	14.5%	% máximo 25
Índice de Alargamiento	INV E-230-07	17.7%	% máximo 25
Ensayo 10% finos	INV-E-224-07	93	% mínimo 60
Ensayo microdeval	INV-E-238-07	6.34%	% máximo 30
Ensayo consistencia (LL, LP e IP)	-	N.P.	No plástico
Ensayo de solidez de sulfatos	INV-E-220-07	9.0	% máximo 18

4.5.3.1 Granulometría

Las curvas granulométricas utilizadas en la investigación, corresponden a las mezclas asfálticas en caliente MD12 (densa) y MS25 (semidensa), cuyas características aparecen a continuación:

- Mezcla asfáltica MD12

En la figura 68 y Tabla N. 17, aparece la franja granulométrica de la mezcla MD12, según especificaciones técnicas del IDU-ET-2011. La granulometría empleada en el estudio fue la curva media, que se observa con línea continua.

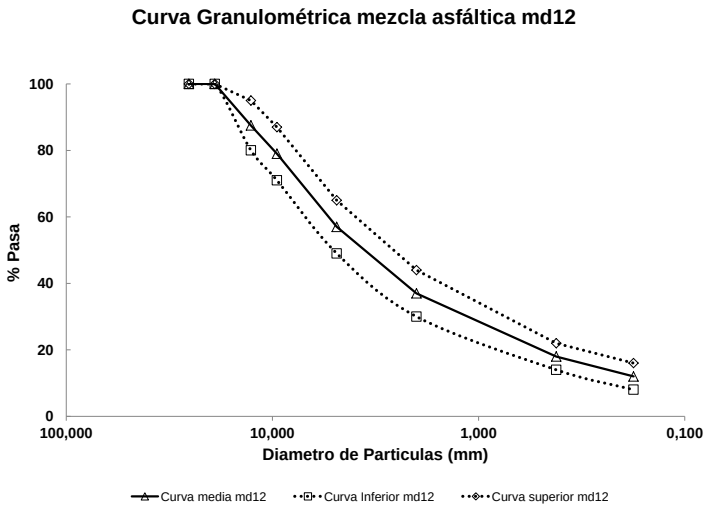


Figura 68. Curva granulométrica mezcla asfáltica caliente cerrada – MD12

Tabla 17. Tabla curva granulométrica mezcla asfáltica - MD12

Tipo de mezcla		TAMIZ (mm/ U.S Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.0	0.425	0.180	0.075
		1 ½ “	1”	3/4”	½”	3/8”	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
		% Pasa									
Densa	MD-12			100	80-95	71-87	49-65	30-44	14-22	8-16	4-9

- Mezcla asfáltica MS25

En la figura 69 y tabla N.18, aparece la franja granulométrica de la mezcla MS25, según especificaciones técnicas del IDU-ET-2011. La granulometría empleada en el estudio fue la curva media, que se observa con línea continua.

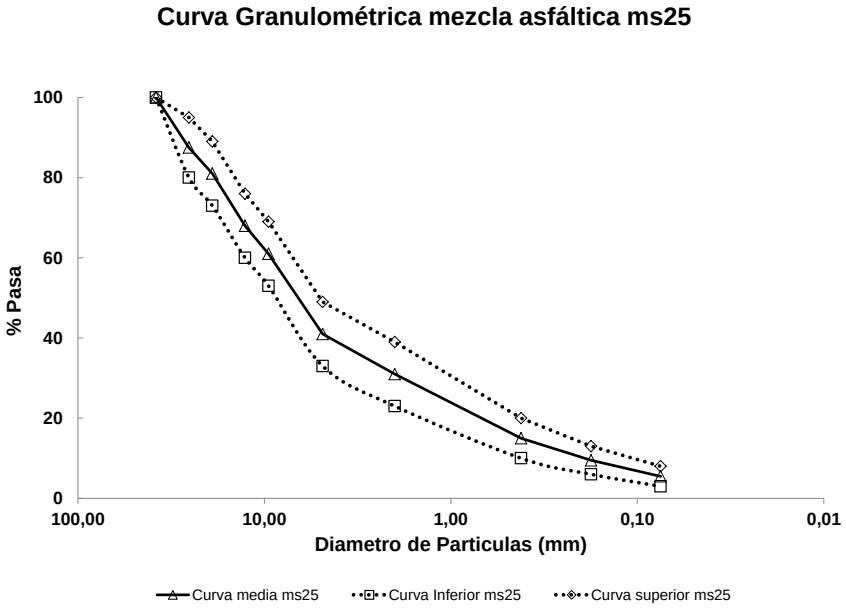


Figura 69: Curva granulométrica mezcla asfáltica cerrada – MS25

Tabla 18. Curva granulométrica mezcla asfáltica - MS25

Tipo de mezcla		TAMIZ (mm/ U.S Standard)									
		37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.0	0.425	0.180	0.075
		1 ½ “	1”	3/4”	½”	3/8”	No.4	No.10	No.40	No.80	No.200
		% Pasa									
Semi densa	MS-25	100	80-95	73-89	60-76	59-69	33-49	23-39	10-20	6-13	3-8

4.5.4 Cemento hidráulico:

El cemento utilizado en la investigación fue cemento Portland tipo I y los parámetros físicos y mecánicos del mismo, se realizaron mediante las normas enunciadas en las especificaciones IDU-ET 2011, sección 600-11 y sus resultados aparecen en el Anexo N. 10

4.5.4.1 Densidad del cemento

El proceso para determinar la densidad del cemento se encuentra especificada en la norma NTC 221, la cual especifica que mediante el empleo del frasco de Le Chatelier (Figura 70), un líquido que no reaccione con el cemento (Keroseno) y el uso de 64 gramos de cemento, se establece su densidad. Las características del cemento utilizado en la investigación son las que aparecen en la Tabla N. 19.

Tabla 19 Densidad del cemento – Aparato Le Chatelier

Muestra	Lectura Inicial (mm)	Lectura Final (mm)	Densidad (kg/m^3)
1	0.5	19.2	2941
2	0.5	19.3	2926
3	0.3	19.2	2957

Figura 70. Aparato Le Chatelier

4.5.4.2 Finura del cemento

La norma utilizada para determinar la finura del cemento fue la INV E-302-07, cuyo objeto es determinar la finura del cemento Portland por medio del aparato Blaine (Figura 71). Esta finura establece que tan fino o grueso es el cemento y está definida como la superficie específica expresada como área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento.

Figura 71. Aparato Blaine

Para determinar la superficie específica del cemento se utiliza una muestra de cemento patrón certificado y se calibra el aparato de Blaine. El proceso de calibración se realiza en dos etapas, la primera se determina el volumen de la capa compactada de cemento, por medio del método de desplazamiento de mercurio, y se calcula el volumen y la masa, en la segunda etapa se determina la permeabilidad al aire y se registra el tiempo (Tp) que tarda en atravesar la capa de cemento patrón. Después se determina la finura del cemento en estudio, para lo cual se ejecuta el ensayo de permeabilidad al aire, para encontrar el tiempo (T) que tarda el aire en atravesar la capa compactada del cemento. En la Tabla N. 20, se observan los datos de calibración del aparato Blaine y en la Tabla N. 21, la finura del cemento de la investigación, cuya superficie específica promedio fue 4589,67 cm^2/g.

Tabla 20. Calibración aparato Blaine

PARAMETROS	DATO PROMEDIO		
MA= Masa de mercurio en la cámara (gr)	104.79		
MB= Masa de mercurio en la cámara con cemento (gr)	77.65		
D= Densidad del mercurio (gr/cm^3)	13.54		
V= _Volumen total del cemento (cm^3)	1.811		
tp=Temperatura ambiente en la calibración (°C)	20.7		
Tp= Tiempo de flujo en la capa del cemento patrón	95.31	98.35	99.9
M= Masa del cemento patrón (gr)	2.852		
d= Densidad del cemento patrón (gr/cm^3)	3.15		
ep= Porosidad del cemento patrón	0.5		
Sp= Superficie especifica del cemento patrón (cm^2/gr)	3818		

Tabla 21. Finura del cemento de la investigación

REPETICIÓN	Temperatura	Masa (g)	Tiempo de	Superficie

	ambiente (°C)		flujo en la capa (seg)	especifica (cm^2/gr)
MUESTRA 1	22.6	2.589	141.87	4597.20
MUESTRA 2	23.4	2.589	141.4	4589.58
MUESTRA 3	22.9	2.589	141.25	4587.14
MUESTRA 4	22.9	2.589	140.69	4578.04
MUESTRA 5	24.0	2.589	141.82	4596.39

4.5.4.3 Masa unitaria del cemento

La masa unitaria del cemento se realizó con base en la NTC-92 y consistió en establecer en primera estancia la calibración del molde y posteriormente la masa unitaria del cemento. El proceso realizado fue registrar la masa del molde vacío, posteriormente se llena de agua hasta el borde y se pesa. Acto seguido se toma la temperatura del agua para así obtener el volumen real del recipiente (Tabla N. 22). El proceso de establecer la masa unitaria del cemento fue introducir al recipiente calibrado cemento desde una altura aproximada de 5 centímetros del borde y finalmente enrasar. Este conjunto de elementos fue pesado y con los datos de la calibración se estableció la masa unitaria del cemento, tal como se observa en la tabla N. 23 y su valor promedio fue 829,30 kg/m^3.

Tabla 22. Determinación masa unitaria del cemento

PARAMETROS	DATOS
Masa del molde vacío, kg	5.1
Masa del molde con agua, kg	8.05
Temperatura del agua, °C	19
Densidad del agua, kg/ cm^3	998.4
Volumen del molde, m^3	0.00295

Tabla 23. Masa Unitaria del cemento

REPETICION	Peso del molde (kg)	Peso molde más cemento (kg)	Masa unitaria (kg/m^3)
MUESTRA 1	5.4	7.85	829.30
MUESTRA 2	5.4	7.80	812.37
MUESTRA 3	5.4	7.90	846.22
MUESTRA 4	5.4	7.85	829.30
MUESTRA 5	5.4	7.85	829.30

4.5.4.4 Consistencia y tiempo fraguado cemento

La determinación de la consistencia normal del cemento tiene como objetivo hallar la cantidad de agua necesaria para dar características plásticas estándar a las pastas de cemento, con la finalidad de normalizarlas y emplearlas en el desarrollo de diferentes ensayos como el tiempo de fraguado y el ensayo de estabilidad volumétrica.

Para la realizar la consistencia normal del cemento se prepara una mezcla de cemento y agua, con 650 gr de cemento y cierta cantidad de agua. Esta mezcla se realiza según el procedimiento de la norma NTC-112 y se coloca en el aparato Vicat (Figura 72) para determinar su consistencia. El mismo proceso, pero con una aguja de diferentes especificaciones sirve para establecer los tiempos de fraguado. En las tablas N. 24 y 25

se encuentra la consistencia del cemento y sus tiempos de fraguado. Así mismo, en la Figura 73, se presenta la curva media de penetración vs tiempo de fraguado del cemento utilizado en la investigación.

Figura 72. Aparato de Vicat

Tabla 24. Consistencia del cemento

PARAMETROS	TANTEOS				
	MUESTRA 1	MUESTRA2	MUESTRA3	MUESTRA4	MUESTRA5
A= Masa de cemento, gr	650	650	650	650	650
B= Masa de agua, gr	195	162.5	189.8	175.5	182
Penetración, mm	31	6	21	7	11
Consistencia (%)= B/A*100	30.0%	25.0%	29.2%	27.0%	28.0%

Tabla 25. Tiempo fraguado cemento

Hora	T(min)	MUESTRA1	MUESTRA2	MUESTRA3	MUESTRA4	MUESTRA5
0:30:00	30.0	1	2	3	4	5
0:45:00	45.0	40	40	40	40	40
1:00:00	60.0	35	37	38	37	37
1:15:00	75.0	33	33	36	36	35
1:30:00	90.0	28	32	35	32	34
1:45:00	105.0	27	31	33	29	31
2:00:00	120.0	19	29	30	28	26
2:15:00	135.0	17	26	26	26	23
2:30:00	150.	14	19	24	25	20
2:45:00	165.0	10	12	19	18	17
3:00:00	180.0	5	6	18	10	12
3:15:00	195.0	3	2	11	3	8
3:30:00	210.0	1	1	2	2	6
3:45:00	225.0	-	-	1	1	1
4:00:00	240.0	-	-	-	-	-
Tiempo fi		95	122	123	135	112
Tiempo ff		195	210	210	225	225

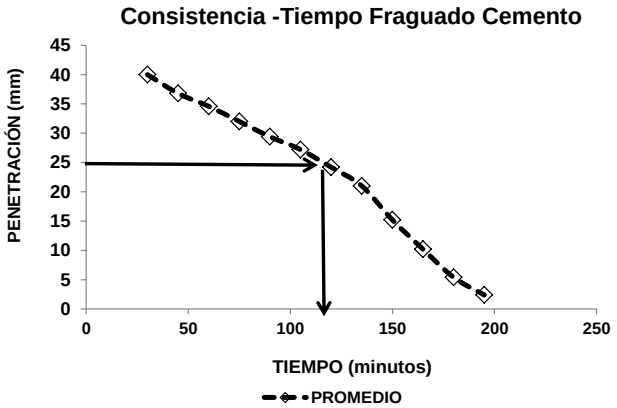


Figura 73. Tiempos de Fraguado

4.5.5 Agregado pétreo para mezclas de concreto:

Las características de los agregados utilizados en la fabricación del concreto y cuya procedencia son el Río Frío, en el municipio de Tabio, aparecen en el Anexo N. 11 y fueron las siguientes:

4.5.5.1 Agregado Grueso y fino

Las propiedades de tamaño máximo, tamaño nominal, densidad aparente, absorción, masa unitaria suelta, masa unitaria compacta, caras fracturadas y desgaste en la máquina de los Ángeles, aparecen en la tabla N. 26.

Tabla 26. Agregado pétreo

PROPIEDAD FÍSICA	NORMA	AGREGADO
Tamaño Máximo	INV-E-217-07	1 ½”
Tamaño Máximo Nominal	INV-E-217-07	1”
Densidad Aparente. S(g/cm^3)	INV-E-222-07	2.68
Densidad Nominal (g/cm^3)	INV-E-222-07	2.55
Densidad Aparente S.S.S (g/cm^3)	INV-E-222-07	2.60
Humedad de Absorción (%)	INV-E-222-07	2.0
Desgaste en la Máquina de los Ángeles (%)	INV-E-218-07	24.19
Equivalente de arena (%)	INV-E-133-07	59
Índice de aplanamiento (%)	INV-E-230-07	14.6
Índice de alargamiento (%)	INV-E-230-07	17.6
Porcentaje de caras fracturadas (1 cara / 2 Caras)	INV-E-227-07	92.2 / 90.1
Azul de metileno g/1000g	INV-E-235-07	0.3 (Cumple)
Ensayo consistencia (LL, LP e IP)	-	No Plástico.
Ensayo de solidez de sulfatos	INV-E-220-07	10.0
Ensayo contenido sulfatos SO4	INV-E-233-07	1.11
Material pasa tamiz # 200	INV-E-214-07	4.1%

Las franjas granulométricas de arena y grava para ser empleadas en la fabricación de concretos según las especificaciones IDU-ET-2011, aparecen con líneas punteadas en las figuras 74 y 75. De otra parte, el material utilizado en el proyecto aparecen con líneas continuas en las mismas gráficas. Se resalta que la arena y grava utilizadas cumple con la normativa IDU-ET-2011.

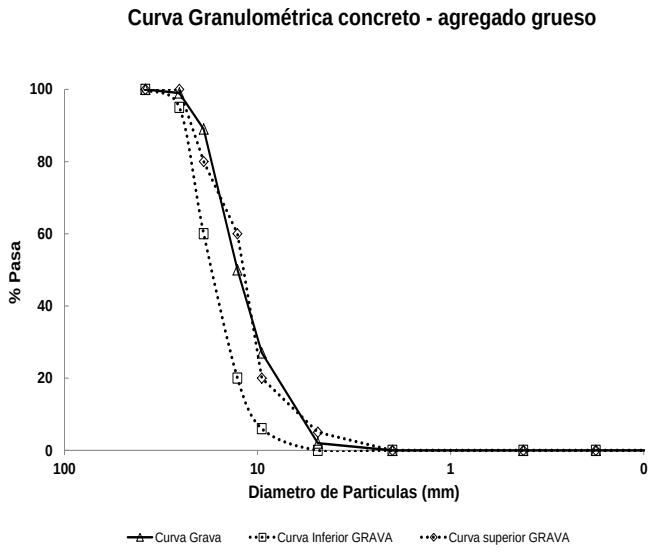


Figura 74. Curva granulométrica de la grava del Río Frío – Tabio

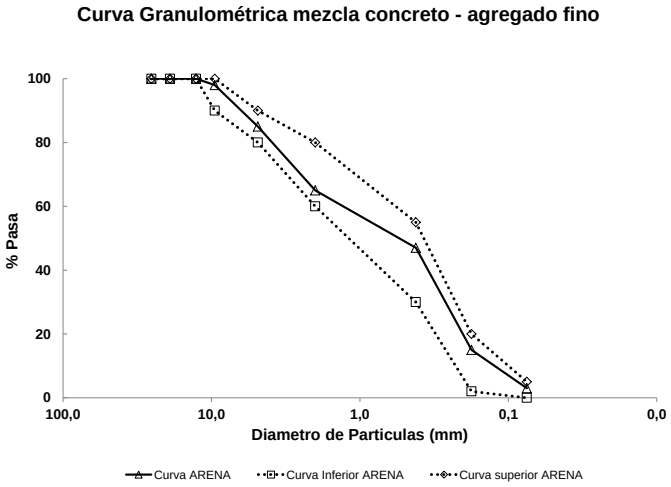


Figura 75. Curva granulométrica de la arena del Río Frío - Tabio

4.6 Diseño mezclas de concreto hidráulico:

El diseño de las mezclas de concreto hidráulico para dos resistencias diferentes (Módulo de rotura Mr=4.0 MPa y 4.5 MPa), se estableció siguiendo los pasos descritos en el diagrama que aparece en la Figura 76 y una vez caracterizado los materiales a utilizar y que estos cumplieran las especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU-ET-2011).

Figura 76. Esquema diseño mezclas de concreto hidráulico. Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001

El primer paso del diseño de la mezcla consistió en seleccionar el asentamiento del concreto, el cual se determinó con base en la Tabla N. 27 [28], que establece los diferentes asentamientos en función del uso del concreto hidráulico. Para el caso del estudio, se seleccionó ***"Pavimentos"*** y su asentamiento oscila entre 20 y 100 mm y una consistencia entre seca y media. Dado el rango de valores, se estableció para el diseño la parte media, con un valor de 50 mm.

Tabla 27. Asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcción.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.3)

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Acto seguido de definir el asentamiento medio de la masa de concreto (50 mm) (Figura 77, foto asentamiento), se establece el tamaño máximo del agregado grueso a utilizar, el cual está en función del espesor de la losa de concreto. Siguiendo las sugerencias y recomendaciones del diseño de mezcla (Tabla N. 28) [28] y características del agregado a utilizar en el estudio, el tamaño definido fue de 1" (una pulgada).

Figura 77. Asentamiento del concreto hidráulico del estudio

Tabla 28 Tamaños máximos de agregados según la construcción.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.4)

Tamaños máximos de agregados según el tipo de construcción				
Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en pulg. (mm)			
	Muros reforzados vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	½"(12)-¾"(19)	¾"(19)	¾"(19)-1"(25)	¾"(19)-1¾"(38)
19 - 29	¾"(19)-1½"(38)	1½"(38)	1½"(38)	1½"(38)-3"(76)
30 - 74	1½"(38)-3"(76)	3"(76)	1½"(38)-3"(76)	3"(76)
75 o más	1½"(38)-3"(76)	6"(152)	1½"(38)-3"(76)	3"(76)-6"(152)

Con las dos variables definidas anteriormente (asentamiento y tamaño máximo de agregado), se estima el contenido de aire (tabla N. 29) [28], que para el caso de pavimentos, las condiciones se establecieron en moderada (aire atrapado naturalmente 1.5%).

Tabla 29. Cantidad aproximada de aire esperado en el concreto.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.5)

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulg.	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.51	⅜	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	½	2.5	4.0	5.5	7.0
19.0	¾	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1½	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152.0	6	0.2	1.0	3.0	4.0

El cálculo del contenido de agua de mezclado, se fundamentó en el origen de los agregados, los cuales son de procedencia de río (redondeados y de textura lisa) y adicional no se incluirá aire al concreto. Dadas estas condiciones de asentamiento (50 mm), tamaño máximo del agregado grueso (1”) y basándose en la tabla N. 30 [28], se obtiene un contenido de agua igual a 167 litros/m^3.

Tabla 30 Requerimiento aproximado de agua para la mezcla.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.6)

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1½"	50.8 2"	64.0 2½"	76.1 3"
mm	pulg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167.	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	143
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Con la información obtenida de asentamiento, tamaño máximo, contenido de aire y agua y calculando la resistencia del concreto de diseño en función del módulo de rotura (Ecuación 2), se establecieron las siguientes resistencias de diseño así:

$$\boldsymbol{Módulo\ Rotura = 2.7\sqrt[2]{f'c}} \quad \text{Ecuación \# 2}$$

- Concreto con módulo Mr=4.0 MPa, resistencia a la compresión simple de 219.5 kg/cm^2

- Concreto con módulo Mr=4.5 MPa, resistencia a la compresión simple de 277.8 kg/cm^2

Debido a que existe una variación de las resistencias en las pruebas y una desviación de las mismas, se debe diseñar con un valor superior, con base en las ecuaciones # 3,4 y 5

$$Coeficiente\ de\ Variación\ = 100 * \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Resistencia promedio}}$$ Ecuación # 3

$$f'cr\ = \text{f'c} - 35 + (2.33\ \text{desviación estándar})$$ Ecuación # 4

$$f'cr\ = \text{f'c} + 1.34\ \text{desviación estándar}$$ Ecuación # 5

Aplicando las ecuaciones 2, se obtiene una variación de aproximadamente 9.3%, obtenido de una variación de 21 kg/cm^2 y una resistencia promedio de 225 kg/cm^2. Estos resultados de coeficiente de variación para laboratorio son muy bueno (Tabla N. 31) [28]. Posteriormente, con las ecuaciones 3 y 4, se obtienen las resistencias para el diseño de las mezclas, las cuales fueron:

- Para Mr= 4.0 MPa, f´cr= 247 kg/cm^2
- Para Mr= 4.5 MPa, f´cr= 305 kg/cm^2

Tabla 31. Normas para el control del concreto.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 10.4)

PRODUCCION GENERAL - VARIACION TOTAL					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes grados de control en kg/cm² (coeficiente de variación para diferentes grados de control en %)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en campo	Menor de 25 (menor de 10)	25 - 35 (-)	35 - 40 (10 - 15)	40 - 50 (15 - 20)	Mayor de 50 (mayor de 20)
Mezclas de prueba de laboratorio	Menor de 15 (menor de 5)	15 - 17 (-)	17 - 20 (5 - 7)	20 - 25 (7 - 10)	Mayor de 25 (mayor de 10)

Una vez definida la resistencia f´cr para las dos tipos de mezcla (247 kg/cm^2 y 305 kg/cm^2), se establece la relación agua/cemento en el límite medio, lo cual se obtiene de la tabla N. 32 [28] y que fueron 0.49 y 0.45 respectivamente. Se resalta que para la resistencia de 247 kg/cm^2, se tomó el límite inferior, dada las restricciones de la Norma IDU-ET-2011, tabla 600.6

Tabla 32 Relación agua/cemento
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.13)

Resistencia a la compresión kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Con los resultados de la relación agua / cemento, se establece los contenidos de cemento, los cuales son:

- Mr=4.0 MPa, A/C = 0.49 , Cemento = 167 litros/0.49 = 340.81 kg/m^3

- Mr=4.5 MPa, A/C = 0.45 , Cemento = 167 litros/0.49 = 371.11 kg/m^3

Finalmente, las proporciones de agregado grueso y fino se establecen con el método A.C.I. 211.1, debido a que cumplen con las especificaciones de la norma Icontec 171.

El cálculo de los contenidos de agregado grueso y fino, se establecen a partir del volumen unitario de los materiales, los cuales son respectivamente para la grava y arena: 1.768 y 1474 kg/m^3, la finura de la arena determinada de su curva granulométrica (2.9) y las correlaciones que aparecen en la tabla N. 33 [28], que para el agregado grueso fue de 0.66.

Contenido de agregado grueso = 0.66 (1768 kg/m^3)=1.167 kg/m^3.

Volumen agregado = 1.167 kg/m^3 / 2.47 = 473 litros / m^3

Tabla 33 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.
Tomado: Diego Sánchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001 (tabla 11.15)

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena (b)

Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm	pulg	2.40	2.60	2.80	3.00
9.51	⅜"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	½	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	¾	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1½	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6	0.87	0.85	0.83	0.81

(a) Los volúmenes están basados en agregados secos y compactos con varilla, como se describe en la norma A.S.T.M. C-29. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un concreto con un grado de manejabilidad apropiado para la construcción reforzada usual. Para obtener un concreto con menos trabajabilidad como el que se utiliza en la construcción de pavimentos de concreto, éstos valores se pueden aumentar en un 10%. Para concreto con más trabajabilidad como el que algunas veces se requiere cuando la colocación se efectúa por bombeo, estos valores se pueden reducir hasta en un 10%.

(b) El módulo de finura de la arena es igual a la suma de las relaciones (acumulativas) retenidas en tamices de malla con aberturas de 0,149, 0,297, 0,595, 1,19, 2,38 y 4,76 mm.

Finalmente, los pesos de los materiales se calculan por metro cúbico de mezcla de concreto, tal como aparecen en la tabla N. 34.

Tabla 34 Diseño mezcla sin fibras, resistencia Mr= 4.0 y 4.5 MPa

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	633.4	2.51	252.39	609.34	2.51	242.77
Aire	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	2308.17		1.000	2314.33		1.000

El procedimiento para establecer los diseños de mezcla con adición de fibras metálicas y sintéticas, fueron los mismos, solo que existía la masa de la fibra a adicionar. Los resultados aparecen en las Tablas N. 35, 36, 37, 38, 39,40, 41, 42 y 43.

Tabla 35. FIBRA 1, dosificación 7.5 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	631.09	2.51	251.43	606.95	2.51	241.81
Fibra 1	7.5	7.85	0.96	7.5	7.85	0.96
Total	2319.44		1.000		2313.28	1.000

Tabla 36. FIBRA 1, dosificación 8.75 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	630.69	2.51	251.27	606.55	2.51	241.65
Fibra 1	8.75	7.85	1.11	7.85	1.11	1.11
Total	2314.13		1.000	2320.29		1.000

Tabla 37. FIBRA 1, dosificación 10.5 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	630.13	2.51	251.06	605.99	2.51	241.43
Fibra 1	10.5	7.85	1.34	10.5	7.85	1.34
Total	2315.32		1.000	2321.48		1.000

Tabla 38- FIBRA 2, dosificación 7.5 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	631.09	2.51	251.43	606.95	2.51	241.81
Fibra 2	7.5	7.85	0.96	7.5	7.85	0.96
Total	2319.44		1.000		2313.28	1.000

Tabla 39. FIBRA 2, dosificación 8.75 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46

Arena	630.69	2.51	251.27	606.55	2.51	241.65
Fibra 2	8.75	7.85	1.11	7.85	1.11	1.11
Total	2314.13		1.000	2320.29		1.000

Tabla 40. FIBRA 2, dosificación 10.5 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	630.13	2.51	251.06	605.99	2.51	241.43
Fibra 2	10.5	7.85	1.34	10.5	7.85	1.34
Total	2315.32		1.000	2321.48		1.000

Tabla 41 FIBRA 3, dosificación 4.0 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	622.45	2.51	247.99	598.31	2.51	238.37
Fibra 3	4.0	0.91	4.4	4.0	0.91	4.4
Total	2301.14		1.000	2307.30		1.000

Tabla 42. FIBRA 3, dosificación 4.5 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	621.08	2.51	247.44	596.93	2.51	237.82
Fibra 3	4.5	0.91	4.95	4.5	0.91	4.95
Total	2300.27		1.000		2306.42	1.000

Tabla 43. FIBRA 3, dosificación 5.0 kilos /m3

Materiales	Módulo rotura Mr=4.0 MPa			Módulo rotura Mr=4.5 MPa		
	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3	Peso seco (kg/m^3)	Peso específico (g/cm^3)	Volumen l/m^3
Cemento	340.81	3.15	108.19	371.11	3.15	117.81
Agua	167.0	1.00	167.00	167.0	1.00	167.00
Grava	1166.88.	2.47	472.42	1166.88	2.47	472.46
Arena	619.70	2.51	246.89	595.35	2.51	237.27
Fibra 3	5.0	0.91	5.49	5.0	0.91	5.49
Total	2305.54		1.000	2299.39		1.000

Por último, El proceso de fabricación de las probetas de concreto hidráulico y ejecución de los ensayos de laboratorio para establecer los diseños de mezcla y posterior evaluación de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico con y sin adición de fibras metálicas y sintéticas (ensayos de resistencia a la compresión, módulo de rotura y módulo de

elasticidad), inicio con la adquisición del material de agregado pétreo (Figura 78), posteriormente con la mezcla de arena, grava, agua y cemento para fabricar el concreto con y sin adición de fibras de las dosificaciones de diseño(Figura 79). A continuación se elaboraron los cilindros y vigas de concreto con y sin adición de fibras para ser curados a diferentes periodos (Figura 80) y ensayados a resistencia a la compresión, módulo de rotura y módulo de elasticidad (Figuras 81).

Figura 78. Adquisición del material pétreo para la fabricación del concreto hidráulico

Figura 79. Proceso de mezclado de materiales para fabricar concreto hidráulico.

Figura 80. Elaboración de probetas cilíndricas y viguetas de concreto

Figura 81. Ejecución de ensayos de compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura.

4.7 Diseño mezclas asfálticas

Para diseñar las mezclas asfálticas con granulometrías MD12 y MS25 de las especificaciones técnicas del IDU, IDU-ET-2011, se utilizó la metodología Marshall para mezclas asfálticas en caliente, tanto para mezclas sin fibras como con fibras. Esta metodología establece que solo es válida para agregados cuyo tamaño máximo sea 25 mm y el empleo de probetas estandarizadas de 4 pulgadas de diámetro por 2.5 pulgadas de altura. El método inicia con establecer la temperatura de fabricación y compactación de la mezcla asfáltica a partir de la curva viscosidad - temperatura del asfalto, la cual aparece en la caracterización del asfalto. Acto seguido, se crean muestras de agregado pétreo con los diferentes tamaños que establece la granulometría a estudiar (MD12 Y MS25) y se conducen al horno a más de 100°C para eliminar cualquier contenido de humedad. Posteriormente, se establecen cinco diferentes porcentajes de asfalto por peso a utilizar, de tal manera que se puedan conformar probetas cuya masa de agregado y asfalto sea 1200 gramos (Figura 82). La preparación de las probetas se hace calentando el asfalto y agregado a la temperatura establecida previamente por la viscosidad del asfalto y mezclándolos hasta cuando las partículas estén totalmente revestidas de asfalto (Figura 83). Al mismo tiempo que se realiza la mezcla, el molde y martillo Marshall se deben calentar, de tal manera que no existan choques térmicos en el proceso de compactación. La compactación de las probetas se hace mediante la aplicación de golpes con el martillo Marshall, los cuales pueden ser 35, 50 o 75 por cada cara y su selección está en función del tipo de tráfico de la vía a construir (Figura 84). Una vez fabricadas las probetas con los diferentes porcentajes de asfalto, se debe establecer la densidad, estabilidad, flujo y vacíos de cada una de ellas (figura 85) y graficar el cambio de sus propiedades con

respecto al contenido de asfalto, curvas que definirán el porcentaje de asfalto a seleccionar.

Figura 82. Bolsas con la granulometría MD12 y MS25 para fabricar probetas Marshall.

Figura 83. Mezclado de los materiales de asfalto, agregado y fibras sintéticas

Figura 84. Compactación de probetas y moldes de compactación.

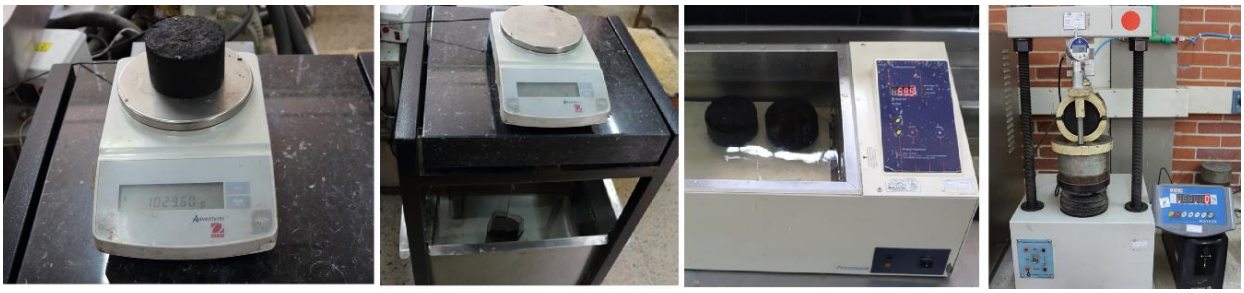


Figura 85. Estabilidad, flujo, densidad y vacíos mezclas asfálticas

Establecidos los porcentajes óptimos de asfalto en función de los requerimientos de la especificación referente a vacíos, estabilidad, flujo y relación estabilidad/flujo y definida la densidad volumétrica de las mezclas, se procedió a fabricar las muestras asfálticas para el estudio mediante el uso del compactador giratorio (figura 86) y compactador de rodillo (figura 87), cuya finalidad fue evitar cambios en la relación de vacíos y densidad de las mezclas del estudio. En las tablas N. 44 y 45, se observan los resultados de los diseños de las mezclas asfálticas en caliente MD12 y MS25 con y sin fibras, donde el porcentaje óptimo se buscó para cumplir el tráfico alto, pero tratando que fuera viable también para los tráficos medio y bajo. Así mismo, en el Anexo N. 12 se encuentran los diseños Marshall del estudio. Se resalta, que se buscó para las mezclas modificadas obtener una relación estabilidad/flujo lo más cercana posible a la especificación.

Figura 86. Fabricación de probetas con el compactador giratorio

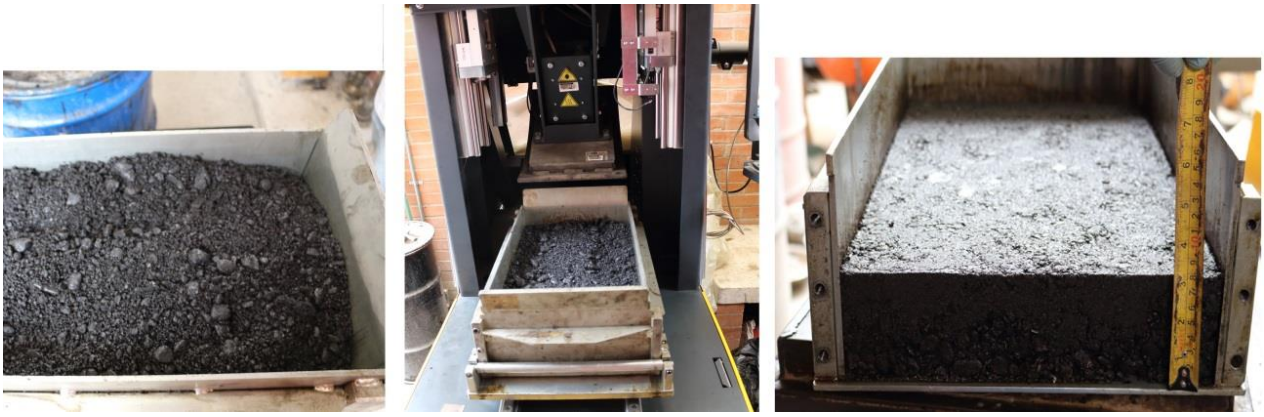


Figura 87. Fabricación de probetas con el compactador de rodillo

Tabla 44. Resultados diseños Diseño mezcla asfáltica virgen MD12

Mezcla asfáltica	Estabilidad (kg)		Flujo (mm)		Densidad (kg/cm^3)	Vacíos (%)	Rango % óptimo	Relación Estabilidad/ Flujo		% óptimo
MD12 virgen	1577		3,12		2.310	4,93	5,5	505		5,5
MD12 Fibra 1 – 0.1%	1687	1389	3,49	4,96	2.302	4,91	5,5 a 6,0	483	280	5,5
MD12 Fibra 1 – 0.2%	1678	1238	3,41	4,73	2.302	4,53	5,5 a 6,0	492	262	5,5
MD12 Fibra 1 – 0.3%	1325	1306	3,48	4,41	2.293	4,34	5,5 a 6,0	381	296	5,5
MD12 Fibra 2 – 0.2%	1410	1675	3,40	3,34	2.291	4,33	5,5 a 6,0	415	501	5,9
MD12 Fibra 2 – 0.3%	1668	1984	3,50	3,69	2.309	4,78	5,5 a 6,0	477	538	5,9
MD12 Fibra 2 – 0.4%	1277	1620	2,69	2,94	2.286	4,54	5,5 a 6,0	475	551	5,9
MD12 Fibra 3 – 0.03%	1872	1558	3,46	3,01	2.285	4,38	5,5 a 6,0	541	518	5,5
MD12 Fibra 3 – 0.04%	1967	1402	3,31	4,1	2.283	4,13	5,5 a 6,0	594	342	5,5
MD12 Fibra 3 – 0.05%	2086	1652	3,09	3,89	2.298	4,37	5,5 a 6,0	675	425	5,5

Tabla 45. Resultados diseños Diseño mezcla asfáltica virgen MS25

Mezcla asfáltica	Estabilidad (kg)		Flujo (mm)		Densidad (kg/cm^3)	Vacíos (%)	Rango % óptimo	Relación Estabilidad/ Flujo		% óptimo
MS25 virgen	1479		3,88		2.264	4,79	5.5	381		5,5
MS25 Fibra 1 – 0.1%	2036	1460	2,97	3,88	2.261	4,01	5,5 a 6,0	686	376	5,5
MS25 Fibra 1 – 0.2%	1294	837	3,07	4,23	2.282	4,71	5,5 a 6,0	421	198	5,5
MS25 Fibra 1 – 0.3%	1422	999	4,29	5,2	2.234	4,68	5,5 a 6,0	331	192	5,5
MS25 Fibra 2 – 0.2%	1800	1632	3,07	2,91	2.264	4,27	5,5 a 6,0	586	561	5,9
MS25 Fibra 2 – 0.3%	2138	1743	4,47	3,53	2.196	3,99	5,5 a 6,0	478	494	5,9
MS25 Fibra 2 – 0.4%	2244	1410	2,96	3,16	2.268	4,58	5,5 a 6,0	758	446	5,9
MS25 Fibra 3 – 0.03%	2227	2014	2,87	3,92	2.218	4,4	5,5 a 6,0	776	514	5,6
MS25 Fibra 3 – 0.04%	2225	1578	2,94	3,95	2.222	4,32	5,5 a 6,0	757	399	5,6
MS25 Fibra 3 – 0.05%	2379	1899	2,87	3,61	2.255	4,22	5,5 a 6,0	829	526	5,6

5. Resultados ensayos mecánicos de mezclas de concreto con y sin adición de fibras

Los ensayos realizados para determinar la incidencia de las fibras de diferente origen y porcentaje en los concretos hidráulicos de resistencia Mr=4.0 MPa y Mr= 4.5 MPa, fueron la resistencia a la compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura. De otra parte, los periodos de curado establecidos en la investigación fueron 3, 7, 14 y 28 días. Sin embargo, al tener muestras testigos de reserva dentro de la investigación, se pudo evaluar la resistencia a los 56 días de curado. Todos los resultados de los ensayos aparecen en los Anexos N. 13-A y 13-B

El promedio de los resultados de la resistencia a la compresión simple del concreto con módulo de rotura de diseño Mr= 4.0 y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras, aparecen en la Tablas N. 46 y 47

Tabla 46. Resistencia promedio a la compresión simple de concretos hidráulicos Mr= 4.0 MPa sin y con adición de fibras.

TIPO MEZCLA	COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,0 MPa	59,60	135,72	195,91	228,33	235,29
FIBRA 1 - 0,1%	66,65	162,04	210,49	244,06	252,92
FIBRA 1 - 0,2%	75,64	176,72	221,50	245,08	254,55
FIBRA 1 - 0,3%	75,02	169,31	222,44	238,14	251,67
FIBRA 2 - 0,1%	75,37	194,27	273,84	283,42	299,22
FIBRA 2 - 0,2%	85,05	188,34	273,65	287,44	305,92
FIBRA 2 - 0,3%	85,72	190,94	288,43	289,23	314,26
FIBRA 3 - 4,0%	79,81	203,16	316,31	329,44	334,71
FIBRA 3 - 4,5%	72,94	202,32	290,96	318,11	324,04
FIBRA 3 - 5,0%	71,80	195,50	270,61	310,88	320,58

Tabla 47. Resistencia promedio a la compresión simple de concretos hidráulicos Mr= 4.5 MPa sin y con adición de fibras

TIPO MEZCLA	COMPRESIÓN SIMPLE (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,5 MPa	60,73	165,15	251,31	292,90	305,72
FIBRA 1 - 0,1%	45,80	136,40	213,27	234,20	237,89
FIBRA 1 - 0,2%	65,57	151,40	229,35	238,31	242,15
FIBRA 1 - 0,3%	63,28	162,32	214,86	237,60	241,35
FIBRA 2 - 0,1%	71,71	167,40	256,01	293,64	303,68
FIBRA 2 - 0,2%	67,01	158,35	234,45	251,35	259,27
FIBRA 2 - 0,3%	58,32	155,16	227,37	225,54	231,32
FIBRA 3 - 4,0%	66,83	191,35	294,25	330,00	340,59
FIBRA 3 - 4,5%	69,25	193,97	280,66	316,73	322,20
FIBRA 3 - 5,0%	62,31	185,95	281,26	315,25	321,20

La resistencia promedio de módulo de elasticidad de las mezclas de concreto hidráulico para módulo de rotura de Mr= 4.0 y 4.5 MPa, sin y con fibras, aparecen respectivamente en las tablas N. 48 y 49.

Tabla 48. Módulo promedio de elasticidad de concretos hidráulicos con Mr= 4.0 MPa, sin y con fibras

TIPO MEZCLA	MÓDULO ELASTICIDAD (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,0 MPa	114.010	173.895	210.309	232.540	236.074
FIBRA 1 - 0,1%	123.001	191.636	192.590	235.884	241.245
FIBRA 1 - 0,2%	131.091	207.203	248.038	248.580	249.760
FIBRA 1 - 0,3%	127.918	182.856	241.034	243.382	247.991
FIBRA 2 - 0,1%	132.829	210.165	249.153	252.040	252.987
FIBRA 2 - 0,2%	140.987	205.015	245.196	256.860	262.235
FIBRA 2 - 0,3%	143.440	211.486	254.375	256.413	259.287
FIBRA 3 - 4,0%	136.448	221.983	269.038	280.287	280.474
FIBRA 3 - 4,5%	133.397	216.299	257.570	266.768	268.429
FIBRA 3 - 5,0%	134.463	215.311	248.216	264.938	272.716

Tabla 49. Módulo promedio de elasticidad de concretos hidráulicos con Mr= 4.5 MPa, sin y con fibras

TIPO MEZCLA	MÓDULO ELASTICIDAD (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,5 MPa	116.769	200.177	238.548	257.908	261.946
FIBRA 1 - 0,1%	103.877	178.323	222.066	246.753	248.594
FIBRA 1 - 0,2%	123.788	185.312	226.834	235.571	238.701
FIBRA 1 - 0,3%	123.243	192.374	218.249	234.847	239.782
FIBRA 2 - 0,1%	134.718	201.982	240.159	247.447	250.594
FIBRA 2 - 0,2%	109.988	193.177	222.168	250.447	251.820
FIBRA 2 - 0,3%	110.484	196.909	229.480	238.440	239.969
FIBRA 3 - 4,0%	128.519	215.174	268.546	279.582	281.355
FIBRA 3 - 4,5%	124.406	217.256	259.529	272.161	274.475
FIBRA 3 - 5,0%	124.533	202.990	254.705	261.882	264.433

Las resistencias promedio de módulo de rotura de las mezclas de concreto hidráulico, cuyo diseño de módulo de rotura fue Mr= 4.0 y 4.5 MPa, sin y con fibras, aparecen respectivamente en las tablas N. 50 y 51,

Tabla 50. Módulo rotura promedio de concretos hidráulicos con diseño de Mr= 4.0 MPa, sin y con fibras

TIPO MEZCLA	MÓDULO ROTURA (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,0 MPa	19,07	30,67	37,38	40,48	41,21
FIBRA 1 - 0,1%	21,43	33,97	41,53	42,68	43,65
FIBRA 1 - 0,2%	23,11	35,30	43,47	45,65	45,98
FIBRA 1 - 0,3%	22,80	34,91	42,69	43,91	44,63
FIBRA 2 - 0,1%	23,62	37,36	44,40	45,19	45,03
FIBRA 2 - 0,2%	25,01	37,21	44,95	45,87	47,85
FIBRA 2 - 0,3%	25,45	37,51	46,03	46,89	47,96
FIBRA 3 - 4,0%	24,00	38,95	47,64	49,29	52,15
FIBRA 3 - 4,5%	23,19	38,13	45,97	48,26	50,23
FIBRA 3 - 5,0%	22,52	37,29	45,91	48,30	50,89

Tabla 51. Módulo rotura promedio de concretos hidráulicos con diseño de Mr= 4.5 MPa, sin y con fibras

TIPO MEZCLA	MÓDULO ROTURA (kg/cm^2)				
	3 DÍAS	7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS	56 DÍAS
VIRGEN Mr=4,5 MPa	20,72	34,17	42,19	45,13	46,32
FIBRA 1 - 0,1%	21,97	35,18	44,48	49,40	50,45
FIBRA 1 - 0,2%	22,56	35,90	46,94	51,53	51,21
FIBRA 1 - 0,3%	25,30	37,79	47,95	50,01	51,29
FIBRA 2 - 0,1%	23,78	39,85	50,26	51,26	52,65
FIBRA 2 - 0,2%	22,45	37,15	45,84	49,00	51,58
FIBRA 2 - 0,3%	21,84	37,36	46,82	49,09	50,78
FIBRA 3 - 4,0%	26,80	41,83	51,20	56,08	57,96
FIBRA 3 - 4,5%	24,75	40,67	52,32	55,21	55,74
FIBRA 3 - 5,0%	23,09	38,04	45,44	50,06	52,45

6. Resultados ensayos mecánicos y dinámicos de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras

Los ensayos realizados para determinar la incidencia de las fibras de diferente origen y porcentaje en las mezclas asfálticas en caliente con granulometría MD12 y MS25, fueron módulo resiliente (cuatro temperaturas y tres frecuencias), resistencia conservada (resistencia a la tracción indirecta en estado seco y húmedo), ley de fatiga y deformación plástica. Todos los resultados de los ensayos aparecen en los Anexos N. 14-A a 14-D.

Los resultados de módulo resiliente para las mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen, aparecen en la tabla N. 52. Así mismo, en la tabla N. 53, aparecen los resultados módulo resiliente de las mezclas asfálticas con granulometría MS25 y con y sin modificación de fibras.

Tabla 52. Módulo resiliente promedio mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen.

ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS (4 TEMPERATURAS Y TRES FRECUENCIAS) ASTM - D 4123 - 82 [Mpa]												
Temperatura [°C]	**10**			**15**			**20**			**25**		
Frecuencia [Hz]	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**
Mezcla Asfáltica MD12	6501,2	8042,7	9250,1	5430,4	6460,0	7460,9	3431,2	4276,6	5070,0	1963,0	2602,4	3202,9
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,1%	7531,6	8963,7	9601,3	5598,3	6779,6	7786,1	3726,6	4713,4	5660,9	2033,5	2739,7	3397,4
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,2%	6736,5	7908,6	8838,0	4908,4	6090,2	6971,8	2940,4	3720,4	4515,3	1497,4	1953,8	2421,2
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,3%	5149,8	5913,8	6580,0	3810,5	4431,3	5221,9	2488,1	3049,3	3719,9	1242,7	1554,3	1890,0
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,2%	8373,2	9937,1	11202,8	6501,1	7844,3	8948,6	4174,2	5376,8	6347,4	2421,1	3159,5	3837,6
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,3%	9579,9	11005,3	11964,6	7424,4	8672,0	9852,8	5291,6	6208,8	7160,6	2989,4	3692,5	4391,7
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,4%	5902,5	6669,9	7363,7	4965,3	5880,6	6544,0	3338,5	4064,8	4704,7	2000,5	2453,4	2901,6
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,03%	9124,1	10124,3	11033,3	6520,6	7670,6	8813,0	4405,2	5289,1	6223,3	2446,0	3177,8	3928,2
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,04%	10486,4	11231,2	11943,9	7723,1	8581,5	9324,7	5764,3	7035,0	7528,6	3423,0	3972,9	4707,6
Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,05%	10660,0	11270,1	12393,0	8225,7	9627,4	10585,4	5057,8	6162,7	6810,2	2972,2	4225,7	4896,1

Tabla 53. Módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen.

ENSAYO DE MÓDULO RESILIENTE EN MEZCLAS ASFÁLTICAS (4 TEMPERATURAS Y TRES FRECUENCIAS) ASTM - D 4123 - 82 [Mpa]												
Temperatura [°C]	**10**			**15**			**20**			**25**		
Frecuencia [Hz]	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**	**2,5**	**5**	**10**
Mezcla Asfáltica MS25	8229,5	9887,0	10691,4	6575,4	7974,1	9161,6	3864,0	4743,3	5594,3	2288,4	3003,6	3661,3
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,1%	5870,5	7410,5	8587,1	4341,8	5588,6	6617,2	2568,4	3329,3	4054,7	1273,8	1782,0	2216,9
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,2%	8679,6	10587,4	11910,9	6389,9	8255,3	9290,1	3959,5	5322,0	6268,6	2499,0	3482,3	4339,9
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,3%	7884,6	9482,8	10583,4	5921,6	7454,8	8428,7	3410,1	4492,7	5079,7	1891,5	2567,4	3175,7
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,2%	7599,5	8821,1	9795,3	5344,2	6202,2	7150,2	3213,4	3992,6	4758,6	1860,7	2494,8	3052,3
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,3%	10123,0	11906,0	13246,5	6930,6	8475,1	9635,2	4187,6	5348,4	6066,7	2571,5	3356,5	4167,0
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,4%	7330,8	8854,2	9863,5	5079,0	6343,2	7349,5	3091,3	3884,3	4617,1	1677,6	2235,8	2744,7
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,03%	7655,6	9169,4	10536,8	5881,0	7236,3	8235,5	3437,7	4456,6	5305,3	1841,0	2442,6	3005,7
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,04%	11975,0	15147,6	16901,0	9159,3	11040,4	12053,9	5314,0	7055,7	8395,4	2746,9	3694,9	4748,3
Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,05%	12652,1	14725,0	15536,0	10042,2	11891,7	12775,1	6347,7	7768,8	9115,1	3688,7	4795,8	5786,4

Los resultados de resistencia conservada para las mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen, aparecen en la tabla N. 54. Así mismo, en la tabla N. 55, aparecen los resultados de resistencia conservada de las mezclas asfálticas con granulometría MS25 con y sin modificación de fibras.

Tabla 54. Resistencia conservada promedio mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen.

TIPO MUESTRA	RTI HÚMEDO [kPa]	RTI SECO [kPa]	PROBETA 1	RTI HÚMEDO [kPa]	RTI SECO [kPa]	PROBETA 2	PROMEDIO
MD12 - VIRGEN	798	805	99,1%	877	917	95,6%	97,4%
MD12 - FIBRA 1 - 0,1%	661	808	81,9%	682	813	83,9%	82,9%
MD12 - FIBRA 1 - 0,2%	716	973	73,6%	811	1002	81,0%	77,3%
MD12 - FIBRA 1 - 0,3%	410	467	87,9%	774	1105	70,0%	78,9%
MD12 - FIBRA 2 - 0,2%	892	1097	81,2%	969	1135	85,4%	83,3%
MD12 - FIBRA 2 - 0,3%	1282	1427	89,8%	1299	1346	96,5%	93,2%
MD12 - FIBRA 2- 0,4%	804	955	84,2%	951	1001	95,0%	89,6%
MD12 - FIBRA 3 - 0,03%	758	1046	72,5%	765	941	81,3%	76,9%
MD12 - FIBRA 3 - 0,04%	930	1066	87,2%	1115	1255	88,8%	88,0%
MD12 - FIBRA 3 - 0,05%	1048	1216	86,2%	984	1142	86,2%	86,2%

Tabla 55. Resistencia conservada promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen.

TIPO MUESTRA	RTI HÚMEDO [kPa]	RTI SECO [kPa]	PROBETA 1	RTI HÚMEDO [kPa]	RTI SECO [kPa]	PROBETA 2	PROMEDIO
MS25 - VIRGEN	1199	1294	92,6%	1201	1234	97,3%	95,0%
MS25 - FIBRA 1 - 0,1%	773	929	83,2%	765	925	82,7%	83,0%
MS25 - FIBRA 1 - 0,2%	1025	1062	96,6%	933	1132	82,4%	89,5%
MS25 - FIBRA 1 - 0,3%	883	1027	86,0%	870	966	90,1%	88,0%
MS25 - FIBRA 2 - 0,2%	766	878	87,2%	789	889	88,8%	88,0%
MS25 - FIBRA 2 - 0,3%	1025	1157	88,5%	964	1235	78,1%	83,3%
MS25 - FIBRA 2- 0,4%	875	992	88,2%	894	1151	77,7%	82,9%
MS25 - FIBRA 3 - 0,03%	976	1070	91,2%	936	1067	87,8%	89,5%
MS25 - FIBRA 3 - 0,04%	1157	1516	76,3%	1151	1256	91,6%	84,0%
MS25 - FIBRA 3 - 0,05%	670	951	70,4%	819	961	85,3%	77,9%

Los resultados de resistencia a la fatiga de las mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen, aparecen en la tabla N. 56. Así mismo, en la tabla N. 57, aparecen los resultados de resistencia conservada de las mezclas asfálticas con granulometría MS25 y con y sin modificación de fibras. Los ensayos fueron hechos a deformación controlada en muestras trapezoidales apoyadas en dos puntos.

Tabla 56. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MD12, sin y con adición de fibras de diferente origen

Probeta N°	Minutos	Seg.	Ciclos (N)	εt	b	e6
VIRGEN - PROMEDIO	922,86	55.371,75	553.718	320,0E-6	-0,204	278,8
	1.543,12	92.587,05	925.871	275,0E-6		
	3.041,44	182.486,55	1.824.866	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,1 % - PROMEDIO	951,32	57.079,05	570.791	320,0E-6	-0,180	262,1
	1.483,85	89.031,15	890.312	275,0E-6		
	2.639,80	158.388,15	1.583.882	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,2 % - PROMEDIO	1.097,80	65.868,00	658.680	320,0E-6	-0,221	286,1
	1.697,87	101.872,05	1.018.721	275,0E-6		
	3.259,50	195.570,15	1.955.702	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,3 % - PROMEDIO	836,26	50.175,75	501.758	320,0E-6	-0,238	275,5
	1.312,73	78.763,95	787.640	275,0E-6		
	2.301,97	138.118,20	1.381.182	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,2% - PROMEDIO	877,76	52.665,75	526.658	320,0E-6	-0,156	291,1
	2.711,03	162.661,65	1.626.617	275,0E-6		
	4.044,66	242.679,30	2.426.793	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,3% - PROMEDIO	577,51	34.650,75	346.508	320,0E-6	-0,137	278,9
	2.209,69	132.581,10	1.325.811	275,0E-6		
	3.093,80	185.627,70	1.856.277	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,4% - PROMEDIO	464,11	27.846,36	278.464	320,0E-6	-0,178	255,6
	1.188,45	71.306,70	713.067	275,0E-6		
	1.814,05	108.843,08	1.088.431	250,0E-6		
FIBRA 3 - 0,03 - PROMEDIO	1.053,92	63.235,35	632.354	320,0E-6	-0,171	304,7
	2.010,58	120.634,65	1.206.347	275,0E-6		
	3.418,10	205.086,15	2.050.862	250,0E-6		
FIBRA 3 - 0,04 - PROMEDIO	951,14	57.068,10	570.681	320,0E-6	-0,147	305,4
	2.500,97	150.058,05	1.500.581	275,0E-6		
	3.438,97	206.338,35	2.063.384	250,0E-6		
FIBRA 3 - 0,05 - PROMEDIO	523,91	31.434,45	314.345	320,0E-6	-0,115	298,0
	1.493,15	89.589,00	895.890	275,0E-6		
	2.875,86	172.551,60	1.725.516	250,0E-6		

Tabla 57. Ley de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MS25, sin y con adición de fibras de diferente origen

Probeta N°	Minutos	Seg.	Ciclos (N)	εt	b	e6
VIRGEN - PROMEDIO	1.084,92	65.094,90	650.949	320,0E-6	-0,234	287,9
	1.921,53	115.291,65	1.152.917	275,0E-6		
	3.132,69	187.961,40	1.879.614	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,1 % - PROMEDIO	678,63	40.717,95	407.180	320,0E-6	-0,235	258,4
	1.248,16	74.889,30	748.893	275,0E-6		
	1.950,03	117.001,50	1.170.015	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,2 % - PROMEDIO	894,28	53.656,95	536.570	320,0E-6	-0,240	277,1
	1.884,62	113.077,05	1.130.771	275,0E-6		
	2.380,48	142.828,95	1.428.290	250,0E-6		
FIBRA 1 - 0,3 % - PROMEDIO	697,99	41.879,10	418.791	320,0E-6	-0,244	258,3
	1.256,99	75.419,25	754.193	275,0E-6		
	1.926,57	115.594,05	1.155.941	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,2% - PROMEDIO	1.057,29	63.437,40	634.374	320,0E-6	-0,224	280,8
	1.597,04	95.822,25	958.223	275,0E-6		
	3.070,10	184.205,85	1.842.059	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,3% - PROMEDIO	1.086,80	65.207,70	652.077	320,0E-6	-0,223	284,8
	1.664,75	99.884,85	998.849	275,0E-6		
	3.181,29	190.877,25	1.908.773	250,0E-6		
FIBRA 2 - 0,4% - PROMEDIO	885,42	53.125,05	531.251	320,0E-6	-0,259	268,9
	1.257,20	75.432,00	754.320	275,0E-6		
	2.212,51	132.750,75	1.327.508	250,0E-6		
FIBRA 3 - 0,03 - PROMEDIO	1.079,07	64.744,35	647.444	340,0E-6	-0,230	298,5
	1.830,00	109.799,85	1.097.999	285,0E-6		
	2.697,17	161.830,35	1.618.304	270,0E-6		
FIBRA 3 - 0,04 - PROMEDIO	780,44	46.826,10	468.261	340,0E-6	-0,216	269,6
	1.403,74	84.224,55	842.246	285,0E-6		
	2.450,32	147.019,05	1.470.191	270,0E-6		
FIBRA 3 - 0,05 - PROMEDIO	1.029,16	61.749,30	617.493	340,0E-6	-0,243	279,3
	1.551,59	93.095,10	930.951	285,0E-6		
	2.777,72	166.663,35	1.666.634	270,0E-6		

Los resultados de deformación plástica de las mezclas asfálticas con granulometrías MD12 y MS25, con y sin adición de fibras, aparecen respectivamente en las tablas N. 58 y 59.

Tabla 58. Deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas MD12

DEFORMACIÓN PLÁSTICA MEZCLAS ASFÁLTICAS - GRANULOMETRÍA MD12										
TIEMPO (minutos)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	Velocidad deformación µm/min
	Deformación (mm)									
VIRGENMD12	0,00	5,26	7,42	8,03	8,68	9,35	9,98	10,39	10,74	23,33
FIBRA 1 - 0,1%	0,00	3,48	5,13	6,23	6,95	7,91	8,23	8,84	9,18	22,33
FIBRA 1 - 0,2%	0,00	4,12	5,47	6,28	6,85	7,68	8,22	8,51	8,89	25,33
FIBRA 1 - 0,3%	0,00	5,36	6,55	6,99	7,81	8,46	9,25	9,74	10,26	34,67
FIBRA 2 - 0,2%	0,00	3,33	4,96	6,13	6,85	7,58	8,32	8,76	9,08	21,13
FIBRA 2 - 0,3%	0,00	3,87	5,27	5,99	6,59	7,42	7,95	8,35	8,63	18,60
FIBRA 2 - 0,4%	0,00	4,13	5,69	6,65	7,35	8,09	8,66	9,22	9,52	20,33
FIBRA 3 - 0,03%	0,00	3,57	4,90	6,05	6,88	7,46	8,17	8,75	9,04	19,33
FIBRA 3 - 0,04%	0,00	2,99	4,58	5,69	6,39	7,25	8,10	8,69	8,97	18,67
FIBRA 3 - 0,05%	0,00	3,00	4,40	5,95	6,59	7,13	8,16	8,56	8,82	17,33

Tabla 59. Deformaciones plásticas de las mezclas asfálticas MS25

DEFORMACIÓN PLÁSTICA MEZCLAS ASFÁLTICAS - GRANULOMETRÍA MS25										
TIEMPO (minutos)	0	15	30	45	60	75	90	105	120	Velocidad deformación µm/min
	Deformación (mm)									
VIRGEN MS25	0,00	5,27	7,45	9,46	11,63	12,65	13,79	14,27	14,73	30,67
FIBRA 1 - 0,1%	0,00	5,47	8,07	9,79	11,59	12,60	14,02	14,59	15,01	28,33
FIBRA 1 - 0,2%	0,00	6,33	8,47	9,79	11,36	11,66	12,95	14,69	15,16	31,00
FIBRA 1 - 0,3%	0,00	6,42	8,68	9,99	11,05	11,96	13,65	15,24	16,03	52,33
FIBRA 2 - 0,2%	0,00	5,55	7,59	9,86	12,58	13,48	14,59	15,69	16,13	29,00
FIBRA 2 - 0,3%	0,00	4,96	7,69	9,26	10,78	12,15	13,25	13,89	14,31	27,67
FIBRA 2 - 0,4%	0,00	5,27	8,27	9,59	11,79	13,69	14,56	15,03	15,43	27,27
FIBRA 3 - 0,03%	0,00	4,59	7,05	9,22	10,56	11,69	12,45	12,85	13,27	27,67
FIBRA 3 - 0,04%	0,00	4,46	6,95	8,95	10,12	11,59	12,35	12,90	13,30	26,67
FIBRA 3 - 0,05%	0,00	4,36	6,25	8,71	10,25	12,03	12,65	13,02	13,41	26,20

7. Análisis de resultados

Con base en los resultados obtenidos de la caracterización de los materiales (asfalto, agregados y cemento), diseños Marshall para las mezclas asfálticas de granulometrías MD12 y MS25 con y sin adición de fibras, módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras (Tres frecuencias y cuatro temperaturas), leyes de fatiga a deformación controlada de mezclas asfálticas de granulometrías MD12 y MS25 con y sin adición de fibras (Temperatura de ensayo 15°C y probetas trapezoidales apoyadas en dos puntos), deformación plástica para las mezclas asfálticas de granulometrías MD12 y MS25 con y sin adición de fibras (Temperatura de ensayo 60°C) y resistencia conservada para las mezclas asfálticas de granulometrías MD12 y MS25 con y sin adición de fibras, diseños de concreto hidráulico para módulos de rotura 4.0 y 4.5 MPa, con y sin adición de fibras, resistencia a la compresión simple (periodo curado 3,7,14,28 y 56 días, resistencia módulo rotura 4.0 y 4.5 MPa y con y sin adición de fibras), módulo de elasticidad (periodo curado 3,7,14,28 y 56 días, resistencia módulo rotura 4.0 y 4.5 MPa y con y sin adición de fibras), módulo de rotura (periodo curado 3,7,14,28 y 56 días, resistencia módulo rotura 4.0 y 4.5 MPa y con y sin adición de fibras), se evaluarán y analizarán los resultados a continuación:

7.1 Caracterización del ligante asfáltico

Los resultados obtenidos de la caracterización del asfalto mediante los ensayos de ductilidad, penetración, punto de ablandamiento, viscosidad, punto de llama e ignición y curva maestra, evidencian que se trata de un asfalto según su penetración 60/70 (62.7), que su ductilidad alcanzada 129 cm, permitiendo que sea utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas ya que es mayor a 100 centímetros. Así mismo, se observa que al presentar temperaturas de punto de llama e ignición superiores a 220°C (236 y 255°C), no se tendrá ningún inconveniente de seguridad y manejo en los procesos de fabricación y compactación en el laboratorio como a escala real al adicionar o no fibras de diferente origen. Referente a su viscosidad, se puede manifestar que el asfalto empleado en la investigación presenta un desempeño adecuado y que su temperatura de mezclado oscila entre 145 y 160°C, lo cual está dentro de los rangos permitidos de la elaboración de una mezcla asfáltica en caliente. Finalmente, la temperatura obtenida en el ensayo de anillo y bola (48.9°C), muestra un valor característico del asfalto producido por ECOPETROL (Refinería de Barrancabermeja) y utilizado en Colombia.

7.2 Caracterización del cemento portland

El cemento portland utilizado en la investigación corresponde al Tipo I y sus características físicas y mecánicas se encuentran dentro de los rangos establecidos en la norma NTC 221 (densidad), NTC-92 (masa unitaria), NTC-112 (consistencia y tiempo de fraguado) y INV E-302-07 o NTC-121 (finura). La densidad fue obtenida mediante la ejecución de tres ensayos según la norma NTC 221 y su valor promedio fue 2941.33 kg/cm3. Se resalta que al ser un cemento tipo I, su densidad debe ser inferior a 3150 kg/cm3 y que en el estudio cumple. Con respecto a la masa unitaria, esta se estableció mediante la realización de cinco ensayos y su valor promedio fue 829.30 kg/m3. Este valor indica que el cemento tiene una densidad suelta baja. Referente a los resultados de consistencia y tiempo de fraguado, el cemento estudiado tienen una consistencia promedio de 27.84% (cinco ensayos), lo cual según investigaciones es un valor normal.

Se resalta, que la norma no establece ningún valor comparativo. Con respecto a los tiempos de fraguado, el tiempo inicial determinado con cinco ensayos fue de 117.4 minutos y el final de 213 minutos. Estos valores cumplen con los estipulados en la norma, siendo mínimo 45 minutos para el inicial y máximo 480 minutos para el final. La finura del cemento se estableció mediante la ejecución de cinco ensayos y su valor promedio fue de 4589,67 cm2/g. Este resultado manifiesta que su finura es relativamente baja, lo cual evidencia un rendimiento bajo y una reacción inerte del núcleo de la partícula de cemento. Así mismo, la finura determinada tiene un valor superior al establecido en la norma de 2800 cm^2/g.

7.3 Agregado pétreo para mezclas asfálticas en caliente

Los agregados que fueron utilizados en la fabricación de las mezclas asfálticas cumplen con las normas de las especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU (IDU-ET-2011), especialmente su resistencia al desgaste, gravedad específica, azul de metileno, índice de aplanamiento y alargamiento, caras fracturadas, 10% de finos y ensayo microdeval y ensayo de solidez de sulfatos, como se evidencia en la Tabla # 16.

7.4 Agregado pétreo para concreto hidráulico

Los agregados finos y gruesos utilizados en la fabricación de los concretos hidráulicos, cumplen con las especificaciones del IDU (IDU-ET-2011), especialmente los referentes a tamaño máximo de partícula, índice de aplanamiento y alargamiento, desgaste, material pasa tamiz #200, equivalente de arena, densidad aparente y nominal, caras fracturadas, tal como se evidencia en la Tabla # 26.

7.5 Diseño Mezclas asfálticas granulometría MD12

Los diseños de las mezclas asfálticas densas en caliente con granulometría MD12 utilizados en el estudio, fueron realizados mediante la metodología Marshall, la cual evaluó la estabilidad, densidad, flujo y vacíos de las mezclas con y sin adición de fibras. A continuación se describirán los resultados obtenidos para cada una de las variables y fibras utilizadas:

7.5.1 Estabilidad

La estabilidad de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la especificación técnica del IDU, establece un valor para tráfico bajo igual o superior a 600 kilogramos y de 900 kilogramos para tráfico alto.

7.5.1.1 Estabilidad Fibras 1

En la Figura 88, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. Se resalta que para todos los porcentajes de asfalto y fibras se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU, estabilidad superior a 600 kilogramos para tráfico medio y bajo y 900 kilogramos para tráfico alto. Para los diferentes porcentajes de adición de fibra y material virgen, los mayores valores de estabilidad se alcanzan con un contenido de asfalto del

5.5%. Se observa que para los porcentajes de fibra al 0.1% y 0.2 %, se obtienen los mayores valores de estabilidad. El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es estabilidad baja a poco y alto contenido de asfalto, alcanzándose un máximo en la parte media (5.5 % de asfalto). El incremento presentado para los porcentajes de 0.1% y 0.2% de fibra 1 fue de 7.0% y 6.4% respectivamente, mientras para el porcentaje de 0.3%, existió un decremento de 16%.

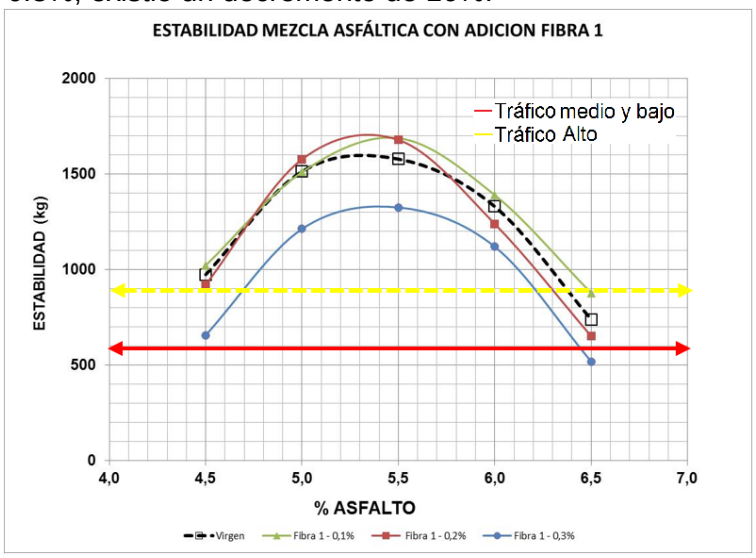


Figura 88. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.5.1.2 Estabilidad Fibras 2

En la Figura 89, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. Se evidencia que para todos los porcentajes de asfalto y fibras se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU, estabilidad superior a 600 kilogramos para tráfico medio y bajo y 900 kilogramos para tráfico alto. En el caso del 6.0% de asfalto, se alcanzan los mayores valores de estabilidad para las muestras con fibra, sin importar su porcentaje, estableciéndose para esta variable un óptimo de asfalto en 5.9% (valor optimizado en el diseño). La mayor resistencia se obtiene para el 0.3% de adición de fibra. Es importante resaltar que para este tipo de fibra, el contenido de asfalto aumenta en 0.4% con respecto a la muestra virgen o sin fibra (5.5%). El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es estabilidad baja a poco y alto contenido de asfalto, alcanzándose un máximo en la parte media-alta (5.9% de asfalto). El incremento presentado en estabilidad de las probetas fue de 6.2% para la dosificación de 0.2%, de 25.8% para la adición de 0.3% y de 15.4% para el contenido de 0.4% de fibra.

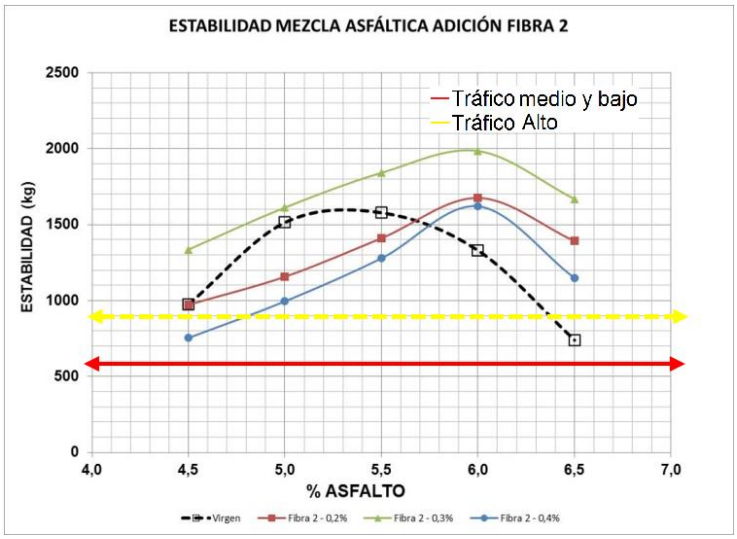


Figura 89. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2**.**

7.5.1.3 Estabilidad Fibras 3

En la Figura 90, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. Se resalta que para todos los porcentajes de asfalto y fibras se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU, estabilidad superior a 600 kilogramos para tráfico medio y bajo y 900 kilogramos para tráfico alto. La resistencia mayor se obtiene para la adición del 0.05% de fibra y un contenido de asfalto de 5.5%, porcentaje similar que la muestra patrón o sin fibras. Se evidencia que para todas las adiciones de fibra, la estabilidad aumenta con respecto a la muestra virgen. El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es estabilidad baja a poco y alto contenido de asfalto, alcanzándose un máximo en la parte media (5.5% de asfalto). Los resultados de la estabilidad óptima de la muestra patrón con referencia a la adición de fibras 3, muestran un decremento del 1% para la dosificación del 0.03% y un incremento de 24.7% para el contenido de 0.04% y un 3.23% para la adición de 0.05% de fibra.

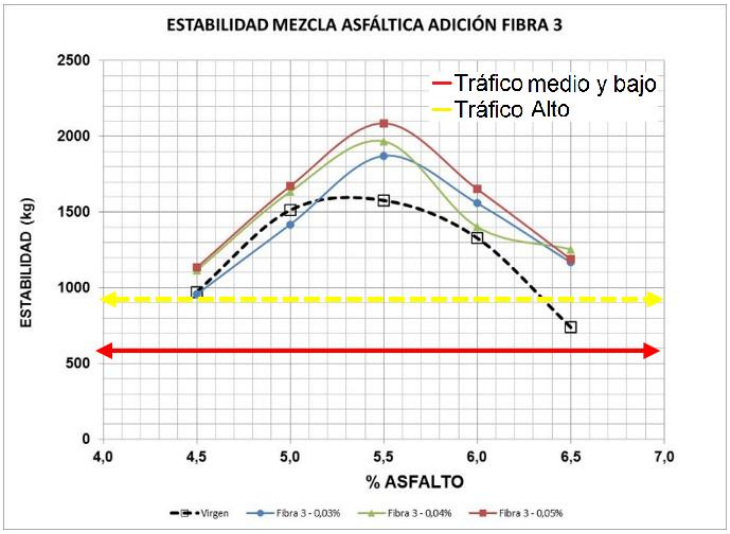


Figura 90**.** Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.5.2 Flujo

El flujo de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la especificación técnica del IDU establece un rango entre 2 y 4 milímetros para tráfico bajo y medio y entre 2 y 3.5 mm para tráfico alto.

7.5.2.1 Flujo Fibra 1

En la Figura 91, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. Se resalta que existe un rango de porcentajes de asfalto (4.7-5.7%) y fibras donde se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU (2 – 4 mm). En el caso de la fibra 1 oscila entre 5.0 y 5.5% de asfalto. El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es flujo pequeño a contenidos bajos de asfalto y se incrementa en la medida que aumenta el contenido de asfalto.

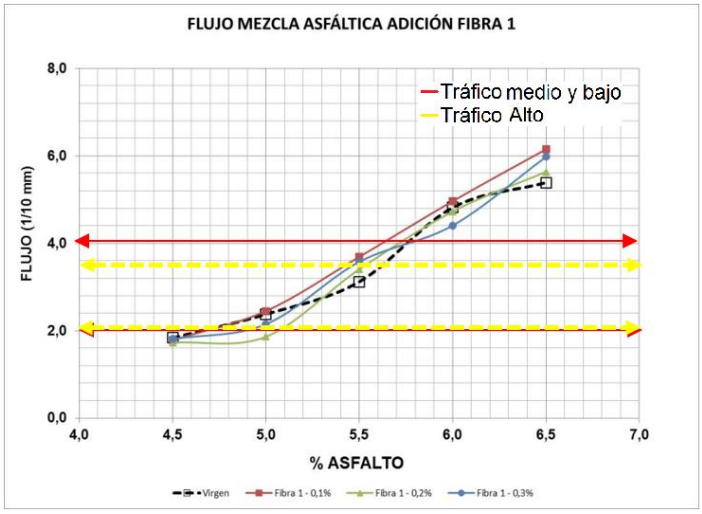


Figura 91. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.5.2.2 Flujo Fibra 2

En la Figura 92, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. Se resalta que existe un rango de porcentajes de asfalto (5.0 – 5.7%) y fibras donde se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU (2 – 4 mm). Sin embargo, el porcentaje óptimo sugerido para esta fibra se estableció en 5.4% de asfalto, valor medio del rango establecido en las especificaciones. El mejor comportamiento de la fibra se observa en 0.3%, al tener un mayor rango de porcentajes de asfalto donde se cumple la especificación. El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es flujo pequeño a contenidos bajos de asfalto y se incrementa en la medida que aumenta el contenido de asfalto.

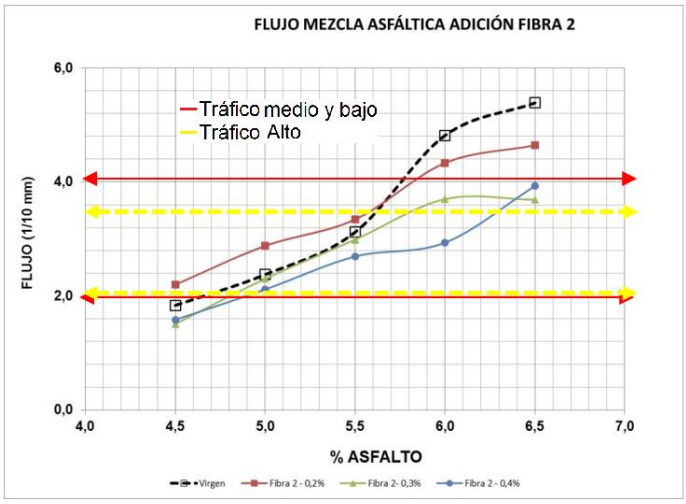


Figura 92. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.5.2.3 Flujo Fibra 3

En la Figura 93, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. Se resalta que existe un rango de porcentajes de asfalto donde se cumple el requerimiento de la especificación técnica del IDU (2 – 4 mm) y cuyos valores son entre 4.8-5.7%. Con base en los diferentes porcentajes de fibra adicionada y el comportamiento del flujo, se establece como óptimo de asfalto el 5.5%. El comportamiento de las curvas sin importar la adición o no de las fibras, es flujo pequeño a contenidos bajos de asfalto y se incrementa en la medida que aumenta el contenido de asfalto. Sin embargo, es importante resaltar que para contenidos altos de asfalto, la fibra genera un leve descenso en el flujo.

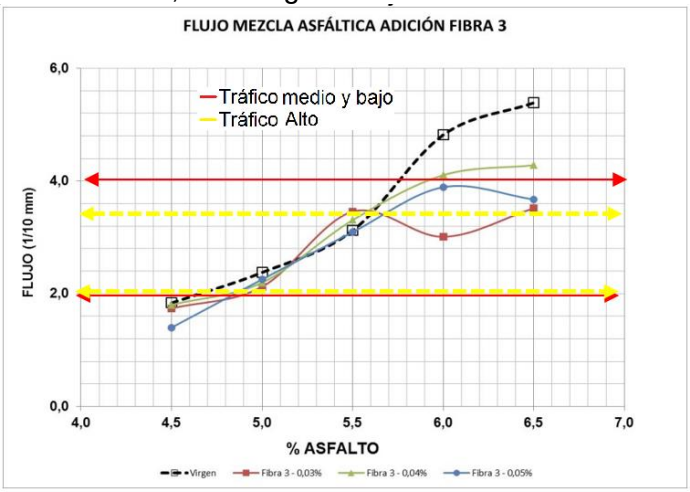


Figura 93**.** Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.5.3 Densidad Bulk

Las densidades Bulk determinadas de las probetas de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación.

7.5.3.1 Densidad Bulk Fibra 1

En la Figura 94, se observa la comparación de las densidades Bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. En el caso del porcentaje de asfalto 5.5, se alcanza el valor máximo, irrelevantemente el porcentaje de fibra introducida. Es importante resaltar que la densidad Bulk se reduce levemente al adicionar fibras a la mezcla (< 1%) y el comportamiento de las curvas de densidad Bulk con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menor a contenidos bajos y altos de asfalto y máxima en la parte media.

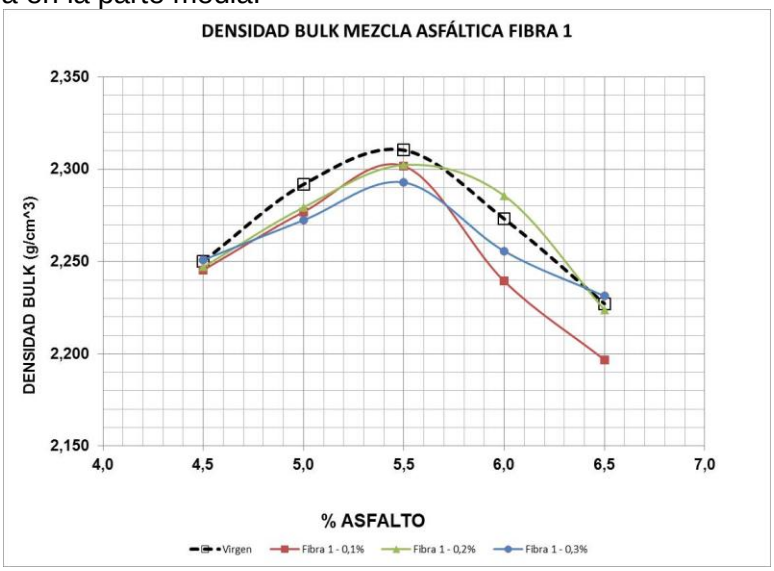


Figura 94. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.5.3.2 Densidad Bulk Fibra 2

En la Figura 95, se observa la comparación de las densidades bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. Se resalta que la fibra 2, irrelevantemente el porcentaje utilizado, absorbe levemente asfalto e induce un incremento del contenido óptimo del mismo en aproximadamente 0.5%. De otra parte, se observa que la adición de fibras desciende levemente la densidad bulk de las mezclas asfálticas (<1%). Se determina un porcentaje óptimo de asfalto de 5.9% con base en la densidad bulk de la mezcla al adicionar fibras 2 en diferentes porcentajes. El comportamiento de las curvas de densidad bulk con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menor a contenidos bajos e ir creciendo en la medida que se adiciona asfalto, hasta alcanzar un valor máximo donde inicia a descender.

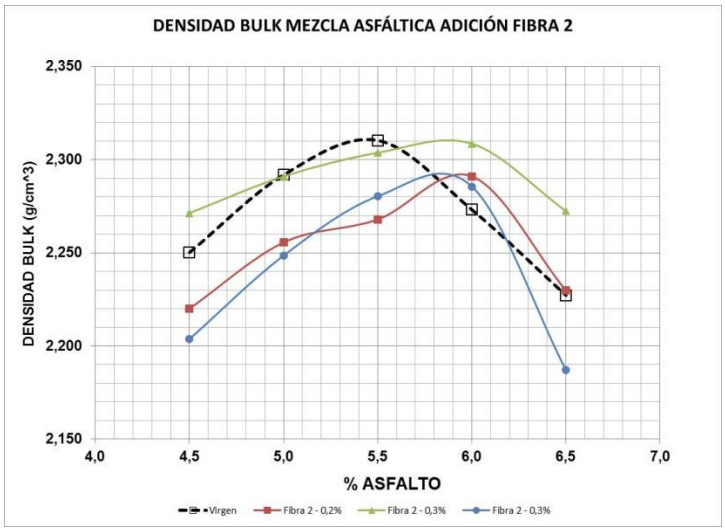


Figura 95. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.5.3.3 Densidad Bulk Fibra 3

En la Figura 96, se observa la comparación de las densidades bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. La incidencia de adicionar fibras 3 a la densidad bulk de la mezcla, es un leve descenso de su valor (<1%), irrelevantemente su porcentaje. Sin embargo, no se observa afectación en el contenido de asfalto y se estable el 5.5% como valor óptimo. El comportamiento de las curvas de densidad con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menores a contenidos bajos y altos de asfalto y máxima en la parte media.

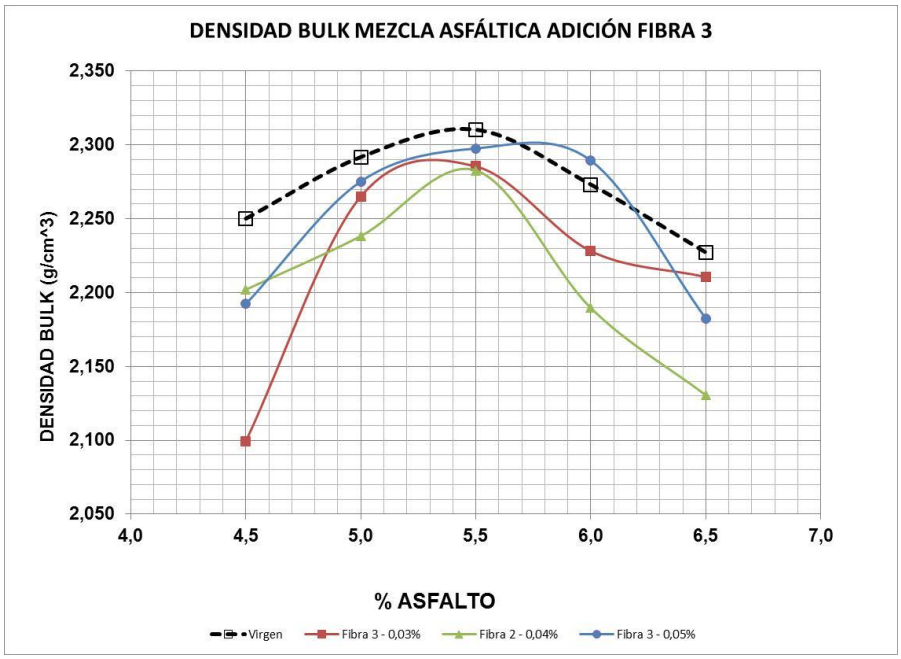


Figura 96. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.5.4 Vacíos

Los vacíos de las probetas fabricadas para las mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la especificación técnica del IDU establece un rango entre 3 a 5 % para tráfico bajo y medio y entre 4 y 6 % para tráfico alto.

7.5.4.1 Vacíos Fibra 1

En la Figura 97, se observa la comparación de los vacíos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. Se evidencia de las curvas que en la medida que aumenta el contenido de asfalto, existe un descenso en los vacíos, irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionada. El porcentaje óptimo determinado para las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de fibras 1, se ubica entre 5.0-6.0%, estableciéndose en 5.5%, valor medio del rango. Esta selección de % de asfalto, cumple con la exigencia de la especificación técnica del IDU.

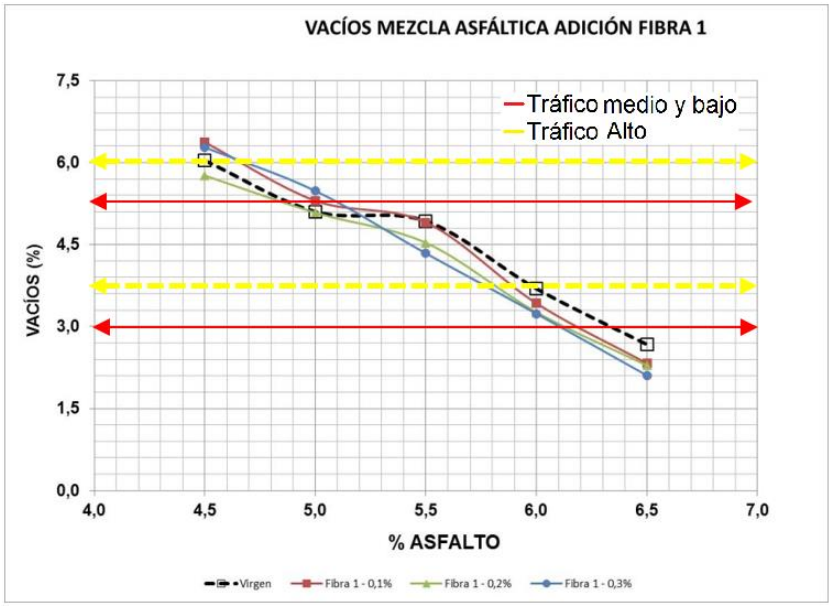


Figura 97. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.5.4.2 Vacíos Fibra 2

En la Figura 98, se observa la comparación de los vacíos de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar fibras 2 y asfalto en diferentes porcentajes. Se evidencia de la curva de vacíos del material virgen y porcentaje menor de adición de fibra 2 (0.2%), que en la medida que aumenta el contenido de asfalto, existe un descenso en los vacíos, mientras para los contenidos altos de adición de fibras (0.3 y 0.4%), dicho comportamiento tiende a ser levemente horizontal, es decir, no existe una relación entre el contenido de asfalto y los vacíos de la mezcla. Sin embargo, irrelevantemente el porcentaje utilizado de fibra, las mezclas cumplen con el requerimiento de vacíos para porcentajes superiores a 4.75%. Se establece en 5.5% el contenido óptimo de asfalto por estar en la zona intermedia del requerimiento de las especificaciones técnicas del IDU.

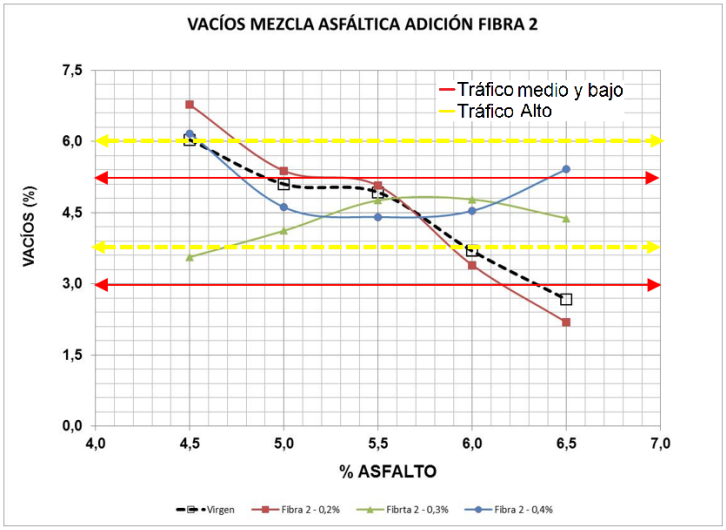


Figura 98. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.5.4.3 Vacíos Fibra 3

En la Figura 99, se observa la comparación de los vacíos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de fibras 3 y asfalto. Se evidencia que al adicionar fibras y asfalto en diferentes porcentajes a la mezcla, no existe un cambio significativo de los vacíos, lo cual si sucede en la muestra sin fibras (muestra patrón). Se resalta que los valores obtenidos para las mezclas con fibras cumplen el requerimiento de la especificación técnica del IDU entre 5.0-6.0%, razón por la cual se establece en valor intermedio (5.5%) como valor óptimo de asfalto.

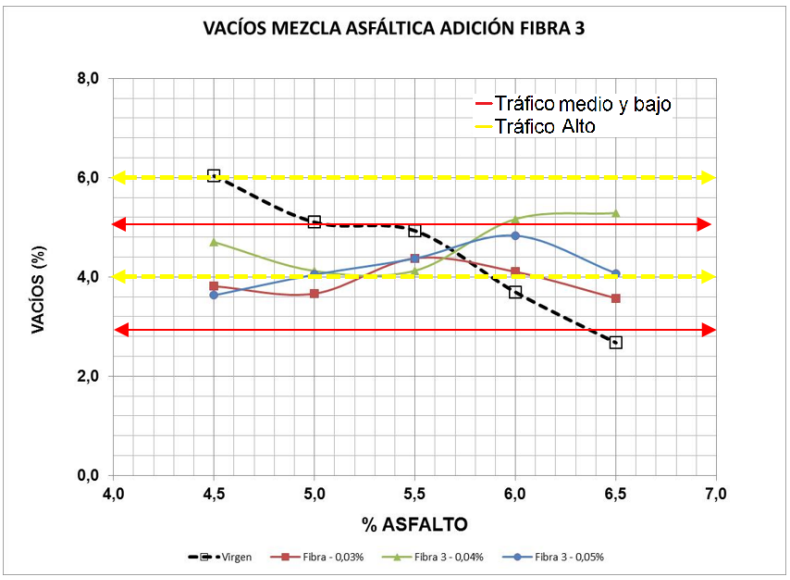
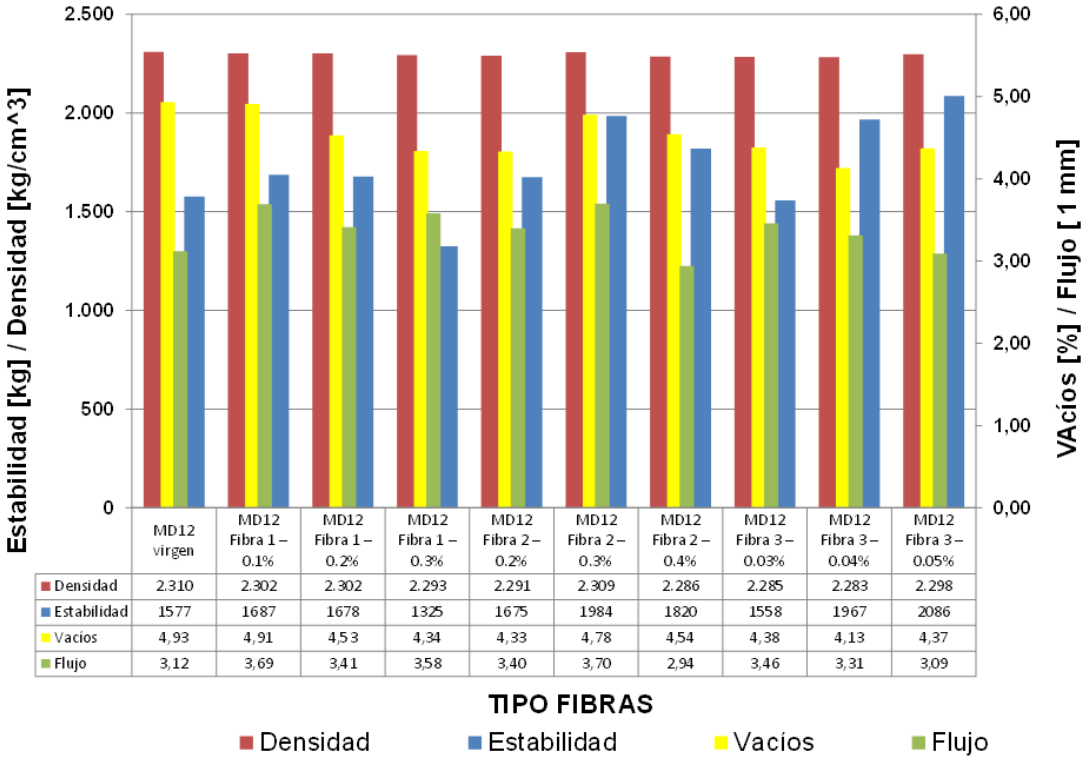


Figura 99. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

En la Figura 100, se observa el comportamiento para el contenido óptimo de asfalto de las variables de los diseños Marshall de las mezclas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras (Estabilidad, densidad Bulk, flujo y vacíos). Se resalta, que todas las

muestras cumplen con el requerimiento de la especificación técnica del IDU (ET-IDU-2011), referente a estabilidad (Mínimo 900 kg), flujo (2 a 4 milímetros para tráfico bajo y medio y entre 2 a 3.5 mm para tráfico alto) y vacíos (3% a 5 % para tráfico bajo y medio y entre 4 y 6 % para tráfico alto.). Así mismo, se observa que la estabilidad aumenta al adicionar fibras, irrelevantemente sus características. Se exceptúa para los casos de la fibra 1 – 0.3% y fibra 3 -0.03%, que existe un leve descenso respecto a la muestra patrón o sin adición de fibras. Los incrementos más elevados se obtienen para las fibras 2 y 3, especialmente la fibra 3 a los porcentajes de 0.04 y 0.05, incremento cercano al 25%. Respecto al comportamiento de la densidad bulk de las muestras con adición de fibras, se observa que para todos los casos hay un descenso leve de su magnitud, siendo mayor en la fibra 3, irrelevantemente el porcentaje utilizado. La respuesta de las probetas respecto al flujo, es un incremento de su valor indiferentemente del tipo de fibra y porcentaje utilizado. Se exceptúa para el caso de la fibra 2 – 0.4%, que disminuyo. Finalmente, la relación de vacíos disminuye para todas las fibras y porcentajes.



	MD12 virgen	MD12 Fibra 1 – 0.1%	MD12 Fibra 1 – 0.2%	MD12 Fibra 1 – 0.3%	MD12 Fibra 2 – 0.2%	MD12 Fibra 2 – 0.3%	MD12 Fibra 2 – 0.4%	MD12 Fibra 3 – 0.03%	MD12 Fibra 3 – 0.04%	MD12 Fibra 3 – 0.05%
Densidad	2.310	2.302	2.302	2.293	2.291	2.309	2.286	2.285	2.283	2.298
Estabilidad	1577	1687	1678	1325	1675	1984	1820	1558	1967	2086
Vacíos	4,93	4,91	4,53	4,34	4,33	4,78	4,54	4,38	4,13	4,37
Flujo	3,12	3,69	3,41	3,58	3,40	3,70	2,94	3,46	3,31	3,09

Figura 100**.** Comportamiento de la estabilidad, densidad, flujo y vacíos los diseños Marshall de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras.

7.6 Diseño Mezclas asfálticas granulometría MS25

Los diseños de las mezclas asfálticas semidensas en caliente con granulometría MS25 utilizados en el estudio, fueron realizados mediante la metodología Marshall, la cual evaluó la estabilidad, densidad bulk, flujo y vacíos de las mezclas con y sin adición de fibras. A continuación se describirán los resultados obtenidos para cada una de las variables y fibras utilizadas:

7.6.1 Estabilidad

La estabilidad de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la especificación técnica del IDU, establece un valor igual o superior a 600 kilogramos para un tráfico bajo y medio y de 900 kilogramos para un tráfico alto.

7.6.1.1 Estabilidad Fibras 1

En la Figura 101, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. De las curvas estabilidad versus contenido de asfalto, se puede establecer que el 5.5% de contenido de asfalto es la dosificación óptima y a su vez cumple la especificación técnica exigida por el IDU (mínimo 900 kilogramos tráfico alto y 600 kilogramos tráfico medio y bajo), irrelevantemente el porcentaje utilizado de fibra 1. De otra parte, se observa que la máxima resistencia se alcanza para la adición de 0.1% de fibra 1 y el incremento es cercano a 25%. Para los casos de 0.2% y 0.3% de adición, existe un descenso de 12.5% y 3.85% respectivamente, pero cumple con la especificación técnica del IDU.

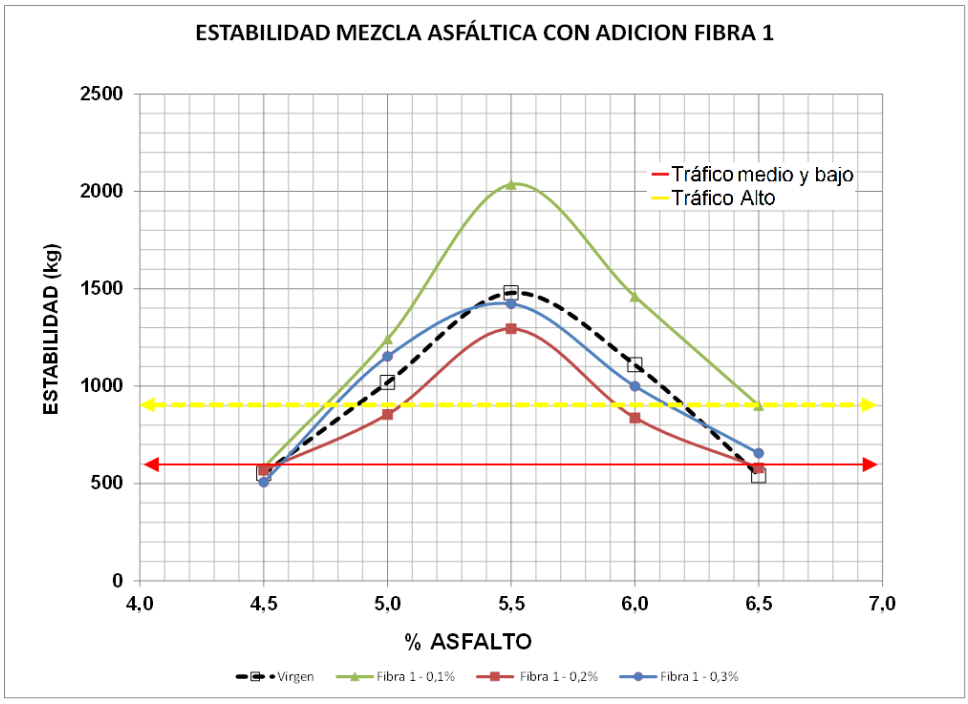


Figura 101. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.6.1.2 Estabilidad Fibras 2

En la Figura 102, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. De las curvas estabilidad versus contenido de asfalto, se evidencia que para lograr el contenido óptimo de asfalto de las mezclas con adición de fibras, se debe incrementar cerca de 0.4% de

asfalto con respecto a la muestra patrón, obteniéndose un 5.9% como porcentaje óptimo. De otra parte, la fibra 2, irrelevantemente el porcentaje utilizado, incrementa la resistencia de la mezcla entre 20-49%. Se resalta, que todas las mezclas cumplen con la especificación técnica del IDU (estabilidad mínima de 900 kilogramos tráfico alto y 600 kilogramos tráfico medio y bajo).

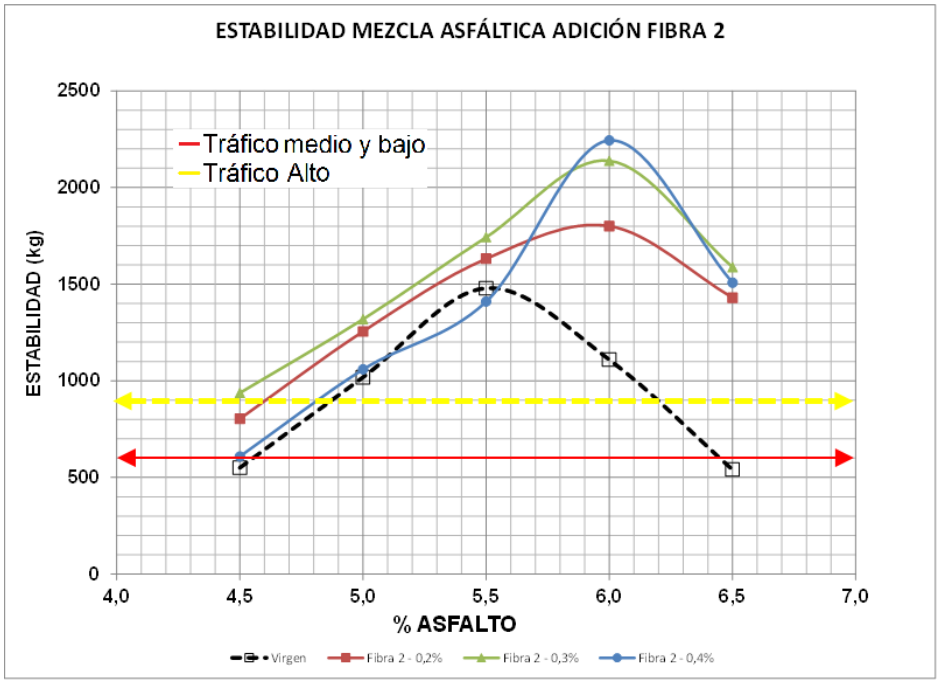


Figura 102. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.6.1.3 Estabilidad Fibras 3

En la Figura 103, se observa la comparación de las estabilidades de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. De las curvas estabilidad versus contenido de asfalto, se establece que el 5.5% de contenido de asfalto es la dosificación óptima y a su vez cumple la especificación técnica exigida por el IDU (mínimo 900 kilogramos tráfico alto y 600 kilogramos tráfico medio y bajo), irrelevantemente el porcentaje utilizado de fibra 3. De otra parte, se observa que todas las dosificaciones de fibras 3 cumplen con la especificación técnica del IDU y adicionalmente presentan incrementos entre 48-58%.

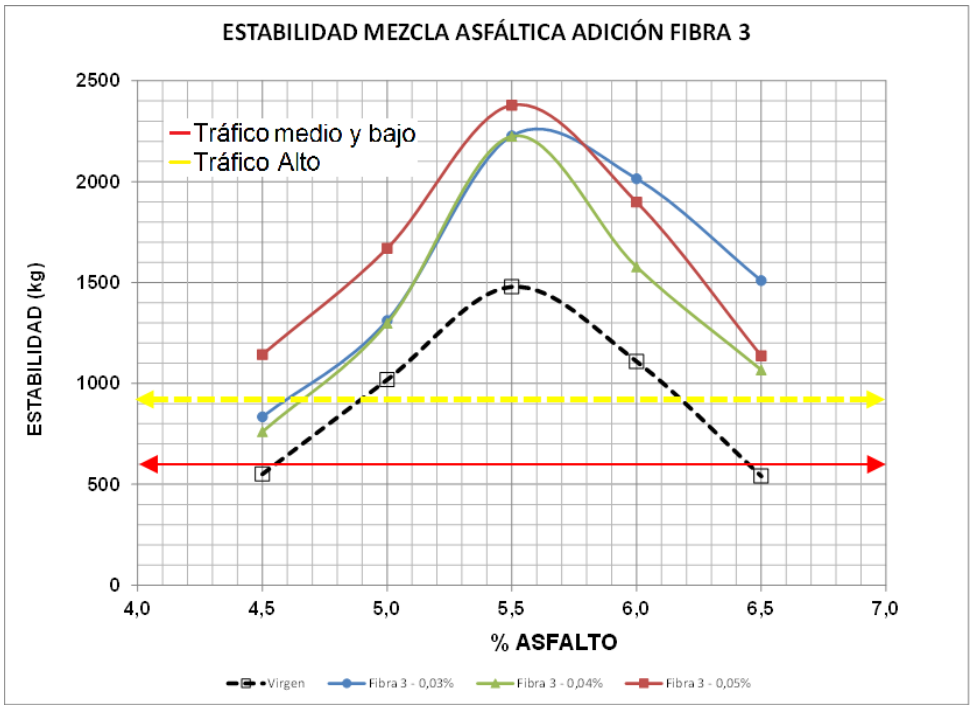


Figura 103. Estabilidad Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.6.2 Flujo

El flujo de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la especificación técnica del IDU establece un rango entre 2 y 4 milímetros para tráfico bajo y medio y entre 2 y 3.5 mm para tráfico alto.

7.6.2.1 Flujo Fibra 1

En la Figura 104, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. Del comportamiento de las curvas se evidencia que existe un rango de porcentajes de asfalto para los cuales se cumple la especificación técnica (4.5 y 5.5%), irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionado. De otra parte, para los porcentajes de 0.1 y 0.2% de fibras 1, el contenido de asfalto puede incrementarse hasta el 6.0%. Sin embargo, se establece como porcentaje óptimo de asfalto el 5.5%, valor igual a la muestra patrón.

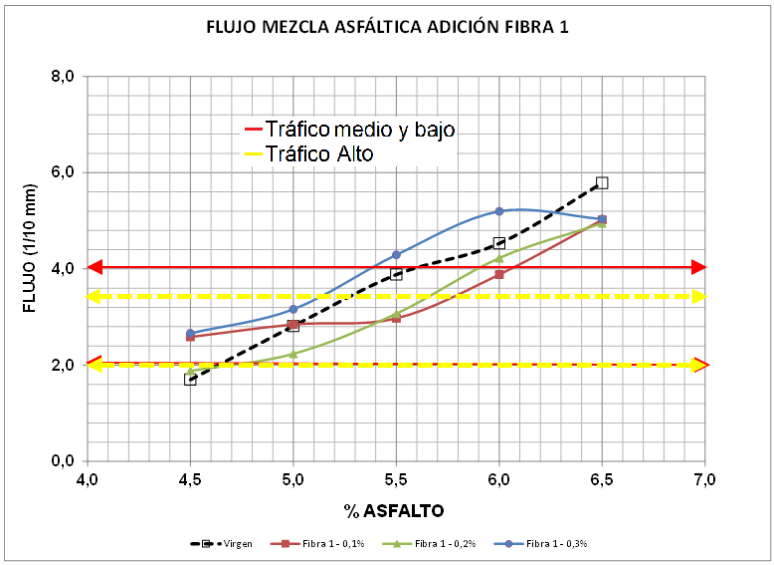


Figura 104. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.6.2.2 Flujo Fibra 2

En la Figura 105, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. Del comportamiento de las curvas se evidencia que existe un rango de porcentajes de asfalto para los cuales se cumple la especificación técnica (4.7 y 5.7%), irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionado. De otra parte, para los porcentajes de 0.2% y 0.4% de fibras 2, el contenido de asfalto puede incrementarse hasta el 6.5%. Sin embargo, se establece como porcentaje óptimo de asfalto el 5.5%, valor igual a la muestra patrón.

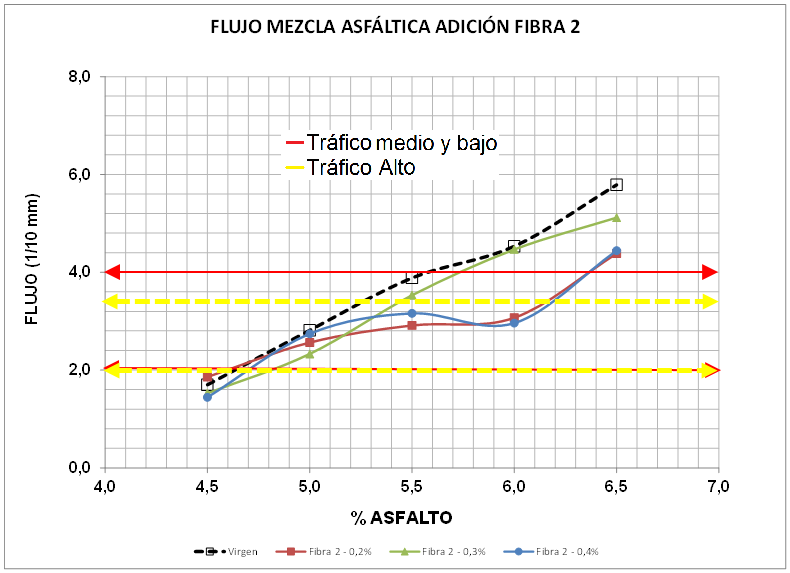


Figura 105. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.6.2.3 Flujo Fibra 3

En la Figura 106, se observa la comparación de los flujos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. Del comportamiento de las curvas se evidencia que existe un rango de porcentajes de asfalto para los cuales se cumple la especificación técnica (4.5% y 6.0%), irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionado. Se establece como porcentaje óptimo de asfalto el 5.5%, valor igual a la muestra patrón y por encontrarse en el rango medio de la especificación técnica.

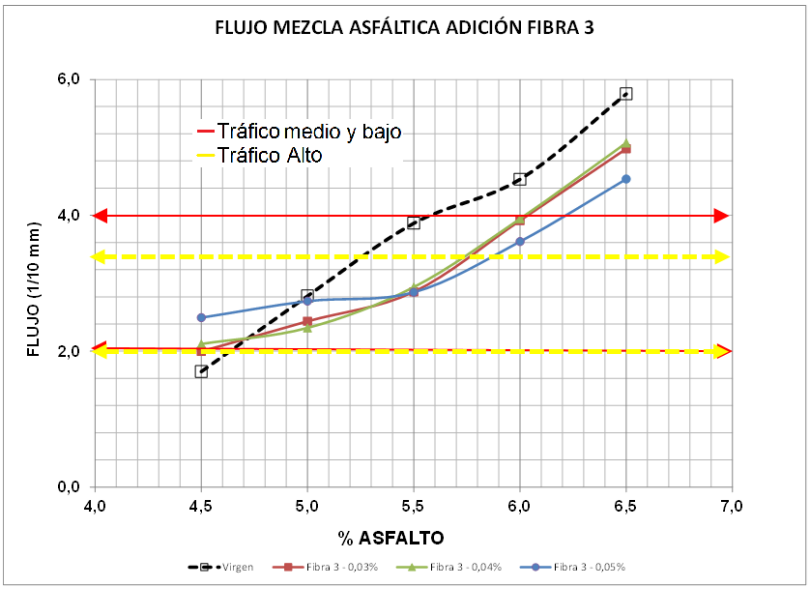


Figura 106. Flujo Marshall versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.6.3 Densidad Bulk

La densidad de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación.

7.6.3.1 Densidad Bulk Fibra 1

En la Figura 107, se observa la comparación de las densidades Bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. En el caso del porcentaje de asfalto 5.5, se alcanza el valor máximo, irrelevantemente el porcentaje de fibra introducida. Es importante resaltar que la densidad Bulk se reduce levemente al adicionar fibras a la mezcla en los porcentajes 0.1% y 0.3% y se incrementa al 0.2%. Sin embargo, se resalta que las magnitudes obtenidas para todas las muestras en el porcentaje óptimo de asfalto (5.5%) son muy similares. Finalmente, el comportamiento de las curvas de densidad Bulk con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menor a contenidos bajos y altos de asfalto y máxima en la parte media.

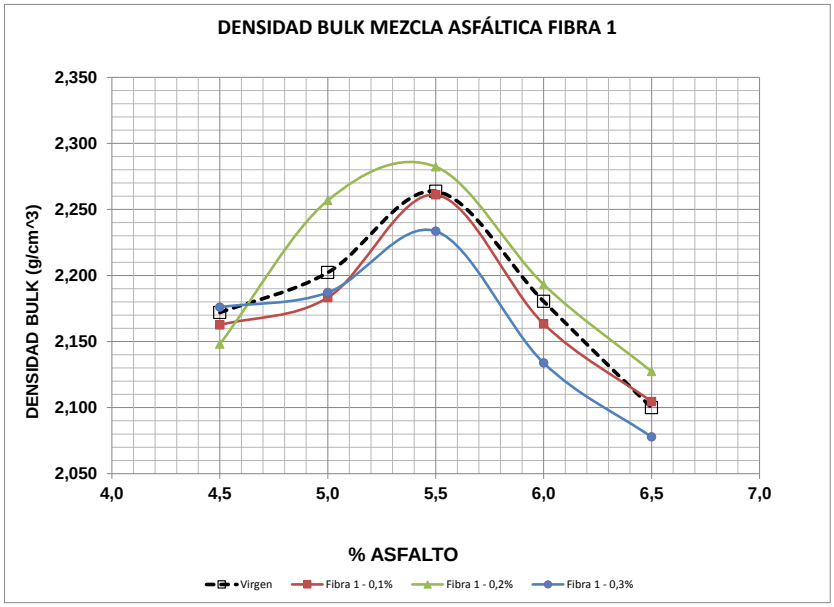


Figura 107. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.6.3.2 Densidad Fibra 2

En la Figura 108, se observa la comparación de las densidades Bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. En el caso del porcentaje de asfalto cercano a 6.0, se alcanzan los valores máximos, irrelevantemente el porcentaje de fibra introducida. Es importante resaltar que la densidad Bulk al adicionar fibras a la mezcla en los porcentajes 0.2% y 0.4%, permanece casi igual a la muestra patrón y para la adición de 0.3%, se reduce levemente (3%). Finalmente, el comportamiento de las curvas de densidad Bulk con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menor a contenidos bajos y altos de asfalto y máxima en la parte media, definiendo para la fibra 2 el porcentaje óptimo en 6.0%.

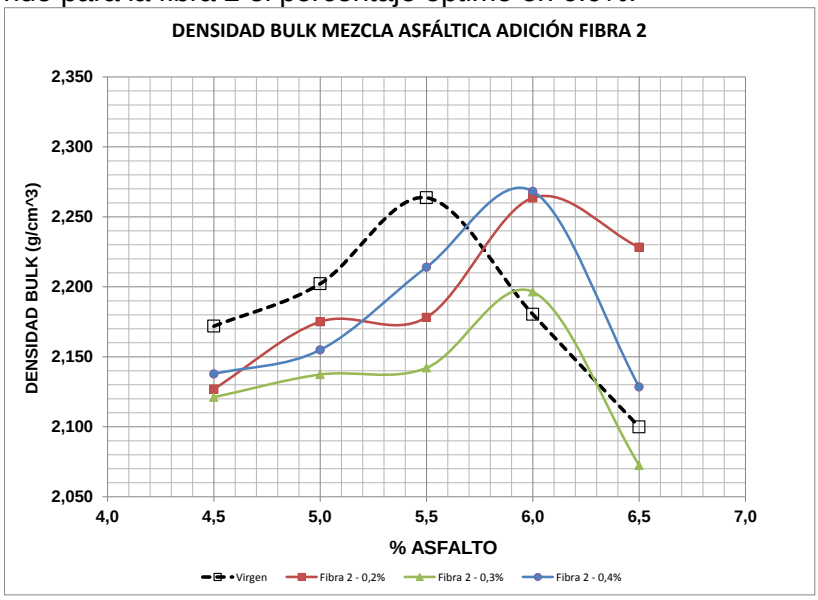


Figura 108. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.6.3.3 Densidad Bulk Fibra 3

En la Figura 109, se observa la comparación de las densidades Bulk de las mezclas asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. Las máximas densidades de las muestras modificadas con fibras 3 y diferentes porcentajes, se logra para el 5.5% de contenido de asfalto. Se resalta que irrelevantemente el porcentaje de fibra introducido a la mezcla, existe una reducción leve de la densidad, siendo mayor su magnitud para los porcentaje de 0.03% y 0.04%. Finalmente, el comportamiento de las curvas de densidad Bulk con los contenidos de asfalto se caracteriza por ser menor a contenidos bajos y altos de asfalto y máxima en la parte media, definiendo para la fibra 3 el porcentaje óptimo en 5.5%, valor igual a la muestra patrón del estudio.

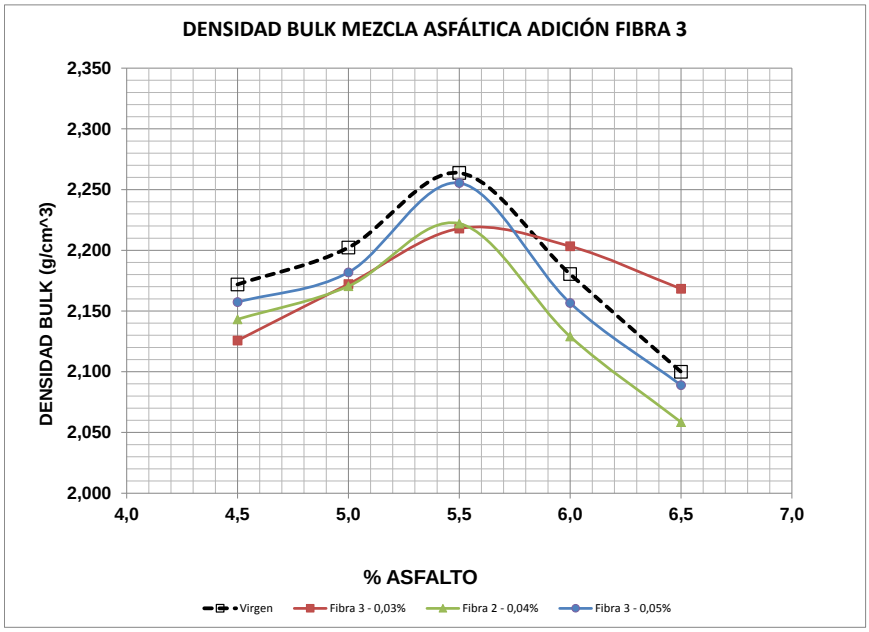


Figura 109. Densidad Bulk versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

7.6.4 Vacíos

Los vacíos de las probetas ensayadas para las mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras de diferentes características y porcentajes, se analizarán a continuación. Se resalta que la norma establece un rango entre 3% a 5 % para tráfico bajo y medio y entre 4% y 6 % para tráfico alto.

7.6.4.1 Vacíos Fibra 1

En la Figura 110, se observa la comparación de los vacíos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 1 y asfalto. Se evidencia de las curvas que en la medida que aumenta el contenido de asfalto, existe un descenso relativamente lineal en los vacíos, irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionada. El porcentaje óptimo determinado para las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de fibras 1, se ubica entre 5.0-6.0%, estableciéndose en 5.5%, valor medio del rango.

Esta selección de porcentaje de asfalto, cumple con la exigencia de la especificación técnica del IDU.

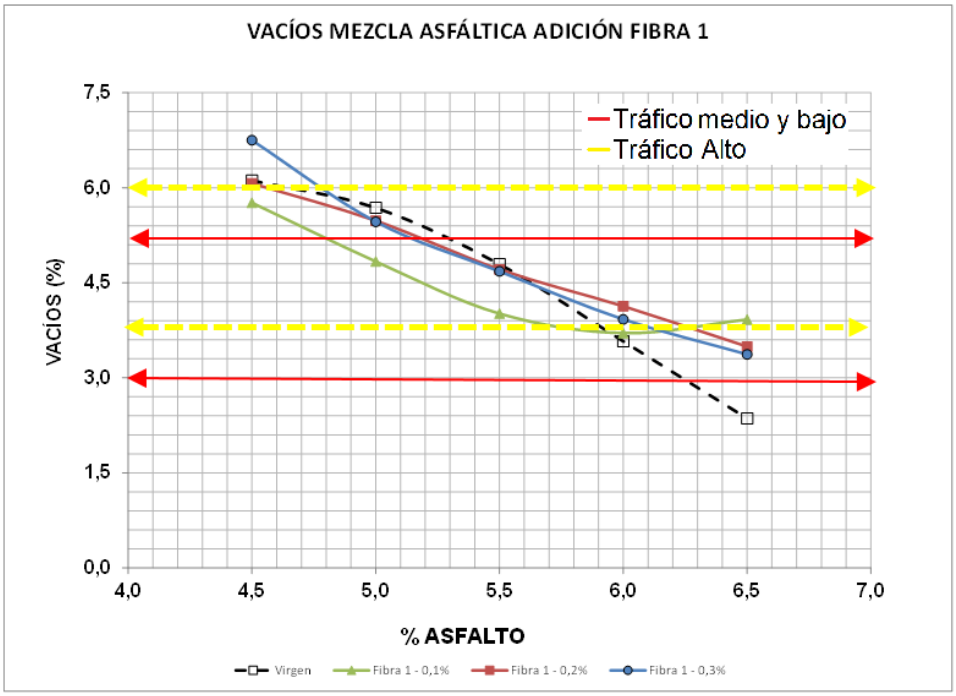


Figura 110. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 1.

7.6.4.2 Vacíos Fibra 2

En la Figura 111, se observa la comparación de los vacíos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 2 y asfalto. Se evidencia de las curvas que en la medida que aumenta el contenido de asfalto, existe un descenso lineal en los vacíos, irrelevantemente el porcentaje de fibra adicionada. El porcentaje óptimo determinado para las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de fibras 2, se ubica entre 4.5-6.5%, estableciéndose en 5.9%, valor medio del rango. Esta selección de porcentaje de asfalto, cumple con la exigencia de la especificación técnica del IDU.

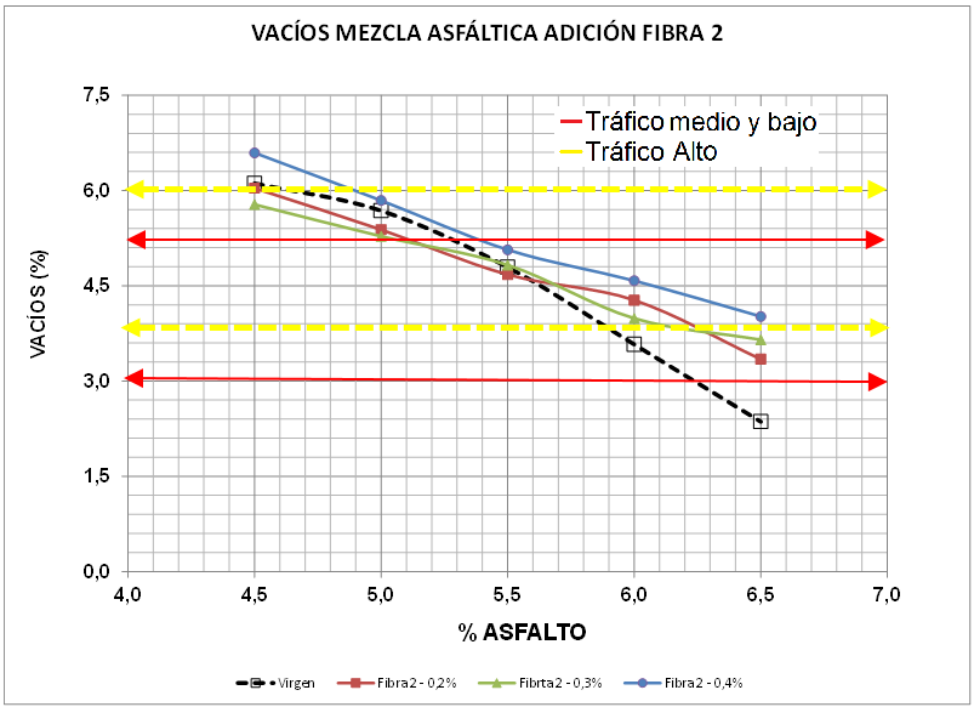


Figura 111. Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 2.

7.6.4.3 Vacíos Fibra 3

En la Figura 112, se observa la comparación de los vacíos de las mezcla asfálticas estudiadas al adicionar diferentes porcentajes de Fibras 3 y asfalto. Se evidencia de las curvas que en la medida que aumenta el contenido de asfalto, existe un descenso lineal en los vacíos hasta el 6.0% y de ahí hasta el 6.5%, las curvas se vuelven casi horizontales. Esta tendencia de los vacíos es similar para los diferentes contenidos de adición de fibra 3. El porcentaje óptimo determinado para las mezclas modificadas con diferentes porcentajes de fibras 3, se ubica entre 4.5% y 6.0%, estableciéndose en 5.5%, valor medio del rango. Esta selección de porcentaje de asfalto, cumple con la exigencia de la especificación técnica del IDU.

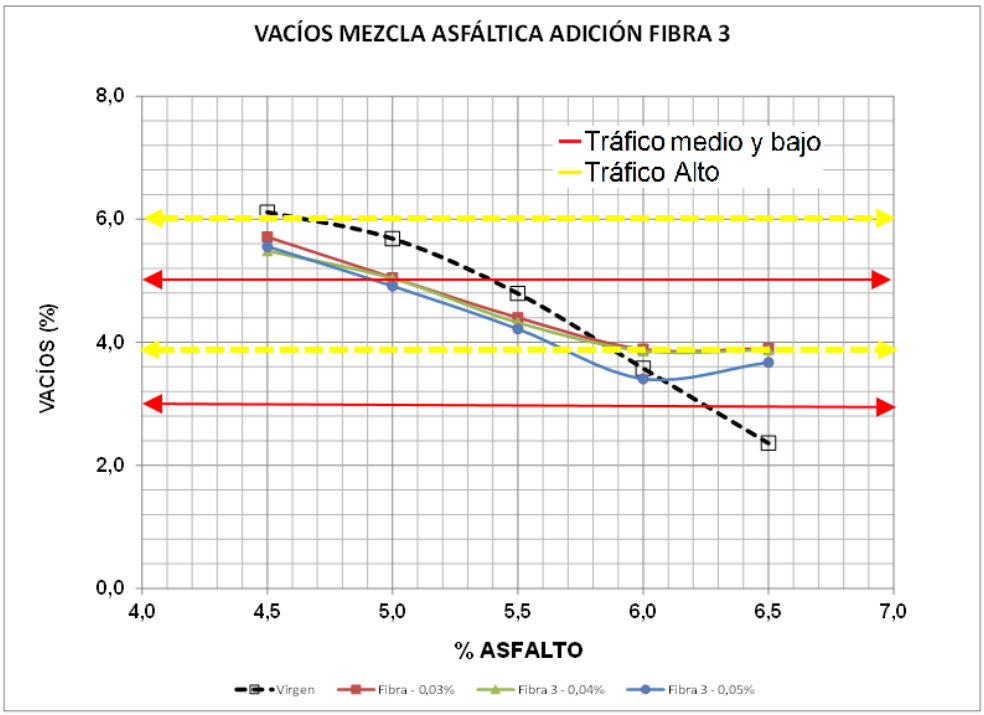
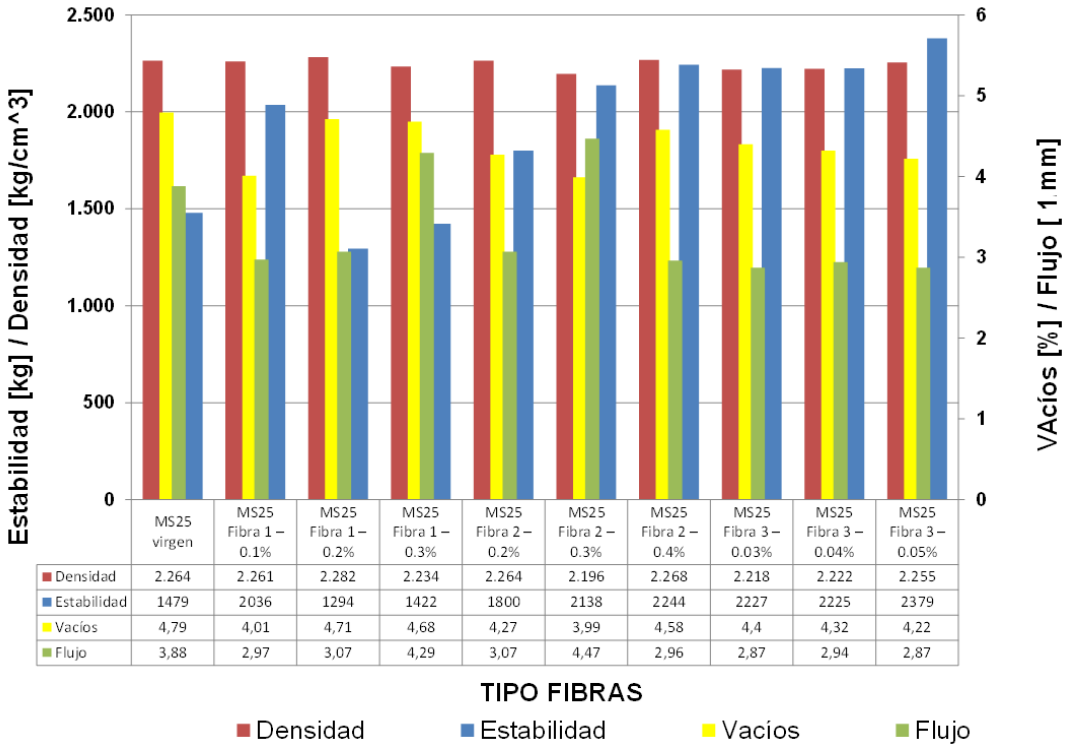


Figura 112.Vacíos versus porcentaje de asfalto y adición de fibra 3.

En la figura 113, comportamiento de la estabilidad, flujo, vacíos y densidad bulk para el porcentaje óptimo de asfalto de las mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras, se puede evidenciar que todas las probetas, sin importar el tipo y porcentaje de fibra utilizada, cumplen con los requerimientos establecidos en las especificaciones técnicas del IDU (ET-IDU-2011), los cuales son estabilidad mínima de 900 kg (tráfico alto) y 600 kg (tráfico medio y bajo), flujo entre 2 a 4 milímetros para tráfico bajo y medio y entre 2 a 3.5 mm para tráfico alto y vacíos entre 3 a 5 % para tráfico bajo y medio y entre 4% y 6% para tráfico alto. De otra parte, se observa que la estabilidad aumenta del orden de 50% al adicionar fibras tipo 2 y 3, irrelevantemente el porcentaje utilizado. Respecto a la fibra 1, la estabilidad solo aumenta para el porcentaje menor (0.1%). Respecto al comportamiento de la densidad bulk de las muestras con adición de fibras, se observa que todos tienen una magnitud muy similar, evidenciando que no existe influencia del origen de la fibra y porcentaje en esta propiedad. La respuesta de las probetas respecto al flujo es un descenso para las diferentes fibras, exceptuando las fibras 1 y 2 para el 0.3%. Finalmente, la relación de vacíos es similar o levemente inferior a la muestra patrón, es decir, no se evidencia incidencia de este parámetros al adicionar fibras de diferente origen y porcentaje.



	MS25 virgen	MS25 Fibra 1 – 0.1%	MS25 Fibra 1 – 0.2%	MS25 Fibra 1 – 0.3%	MS25 Fibra 2 – 0.2%	MS25 Fibra 2 – 0.3%	MS25 Fibra 2 – 0.4%	MS25 Fibra 3 – 0.03%	MS25 Fibra 3 – 0.04%	MS25 Fibra 3 – 0.05%
Densidad	2.264	2.261	2.282	2.234	2.264	2.196	2.268	2.218	2.222	2.255
Estabilidad	1479	2036	1294	1422	1800	2138	2244	2227	2225	2379
Vacíos	4,79	4,01	4,71	4,68	4,27	3,99	4,58	4,4	4,32	4,22
Flujo	3,88	2,97	3,07	4,29	3,07	4,47	2,96	2,87	2,94	2,87

Figura 113 Comportamiento de la estabilidad, densidad Bulk, flujo y vacíos de los diseños Marshall de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras.

Finalmente, del análisis de la estabilidad, flujo, densidad Bulk y vacíos de las mezclas asfálticas en caliente MD12 y MS25, con y sin adición de fibras, se estableció como porcentaje óptimo de asfalto 5.5% para las fibras 1 y 3, y 5.9% para la fibra 2. Estos porcentajes fueron utilizados para fabricación y ensayar todas las probetas a módulo resiliente, ley de fatiga, deformación plástica y resistencia conservada.

7.7 Comportamiento mecánico de concretos hidráulicos modificados con fibras y resistencia de diseño Mr=4.0 y 4.5 MPa

El comportamiento mecánico del concreto hidráulico depende de muchas variables (tipo de cemento, origen y características de la arena y grava, curva granulométrica, relación agua/cemento y periodo de curado entre otras), motivo por el cual al evaluar su respuesta, se deben ejecutar ensayos que establezcan su comportamiento tanto a compresión como a flexión. Dentro de la investigación desarrollada, se ejecutaron ensayos de compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura a concretos con y sin adición de fibras. Los testigos fueron curados a 3, 7, 14, 28 y 56 días y su fabricación se realizó con base en los diseño de resistencia Mr 4.0 MPa y 4.5 MPa. A continuación se analizan los resultados obtenidos para compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura.

7.7.1 Módulo de elasticidad de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia Mr=4.0 MPa

El comportamiento del módulo de elasticidad de los concretos modificados con fibras 1, 2 y 3, a diferentes dosificaciones y resistencia de diseño Mr=4.0 MPa, se analizarán a continuación. Se resalta que se ejecutaron tres muestras por tipo de fibra, porcentaje de dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellos.

En la figura 114, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan incrementos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. Para la adición de 0.1% y 14 días de curado, se observó que el módulo no alcanza el valor que sigue la tendencia normal. Sin embargo, para el periodo de 28 y 56 días, su respuesta fue la esperada. Referente a las adición de 0.2% y 0.3%, los módulos presentan un incremento entre el 10% y 19%.

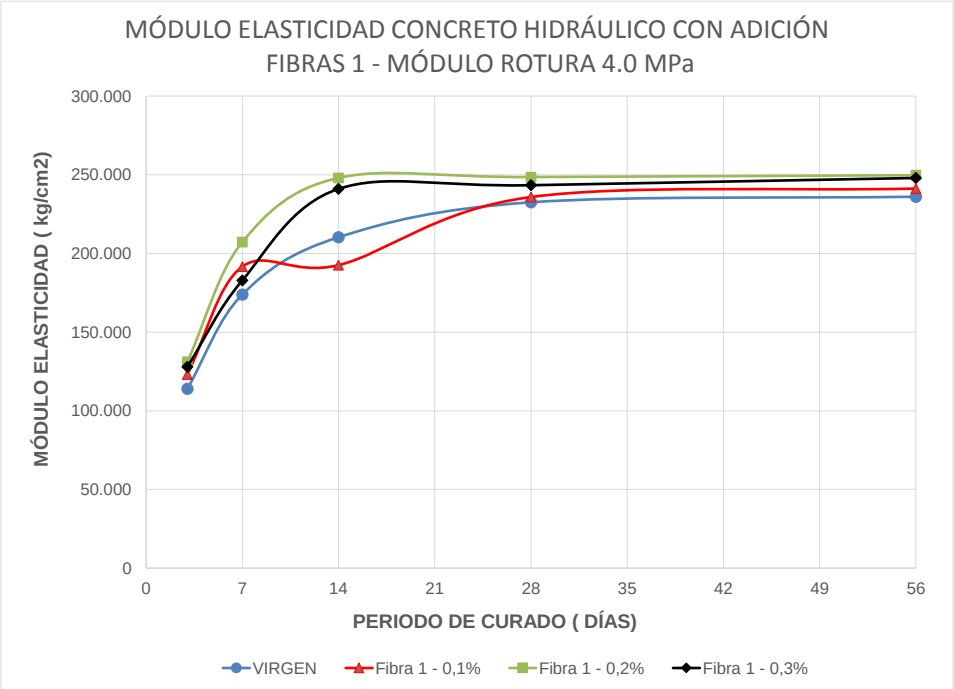


Figura 114. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 115, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan incrementos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. Así mismo, se observa que la magnitud del módulo de elasticidad para los diferentes porcentajes de fibra 2 y periodos de curado, es muy similar, planteando que no existe una afectación directa entre el porcentaje introducido y la respuesta mecánica del concreto ante la fibra. Los incrementos del módulo oscilan entre 10% y 26%.

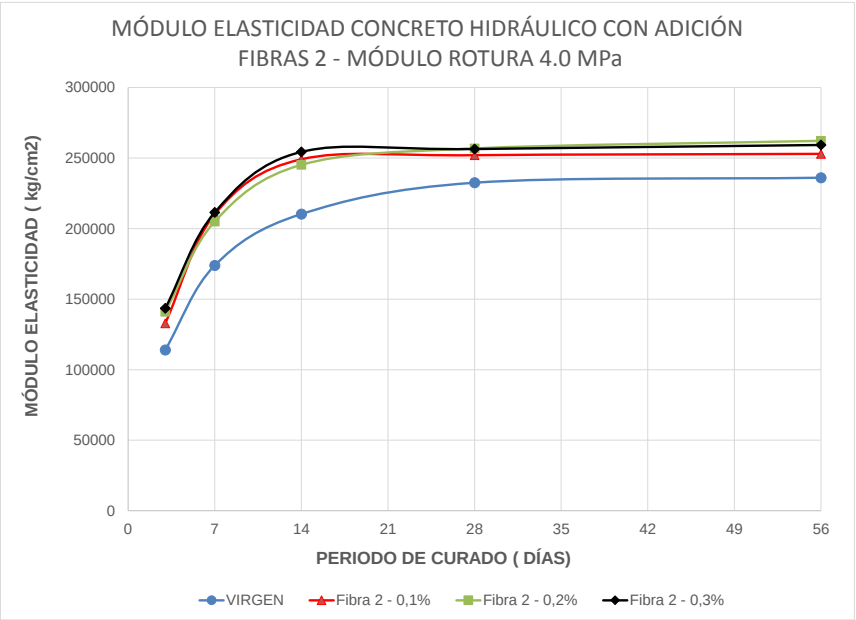


Figura 115. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 116, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan incrementos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. De las tres dosificaciones utilizadas, el porcentaje de 4.0% presenta las condiciones más favorables, al incrementar entre su resistencia entre 14% y 28%. Se resalta que las dosificaciones de 4.5% y 5.0%, incrementan la resistencia, pero en magnitudes inferiores.

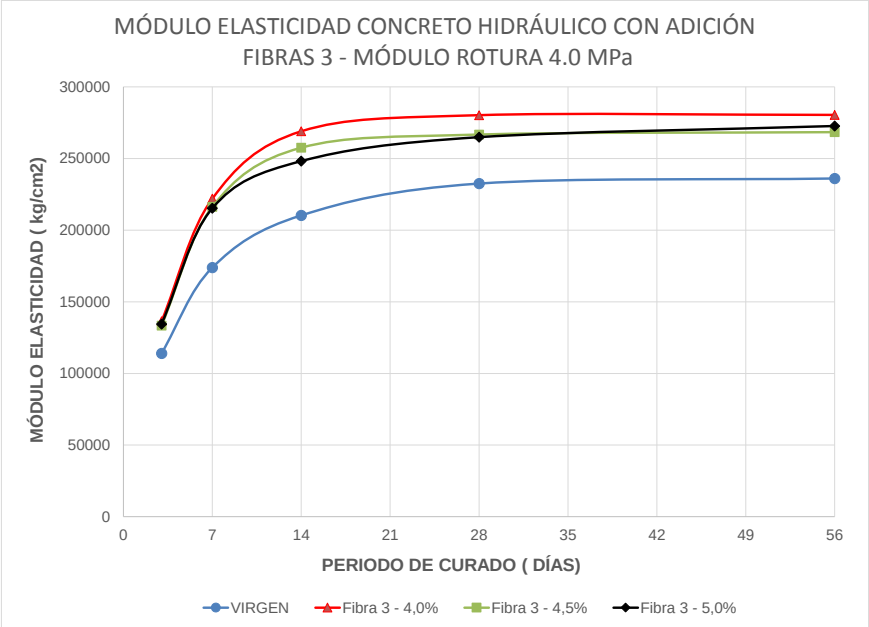
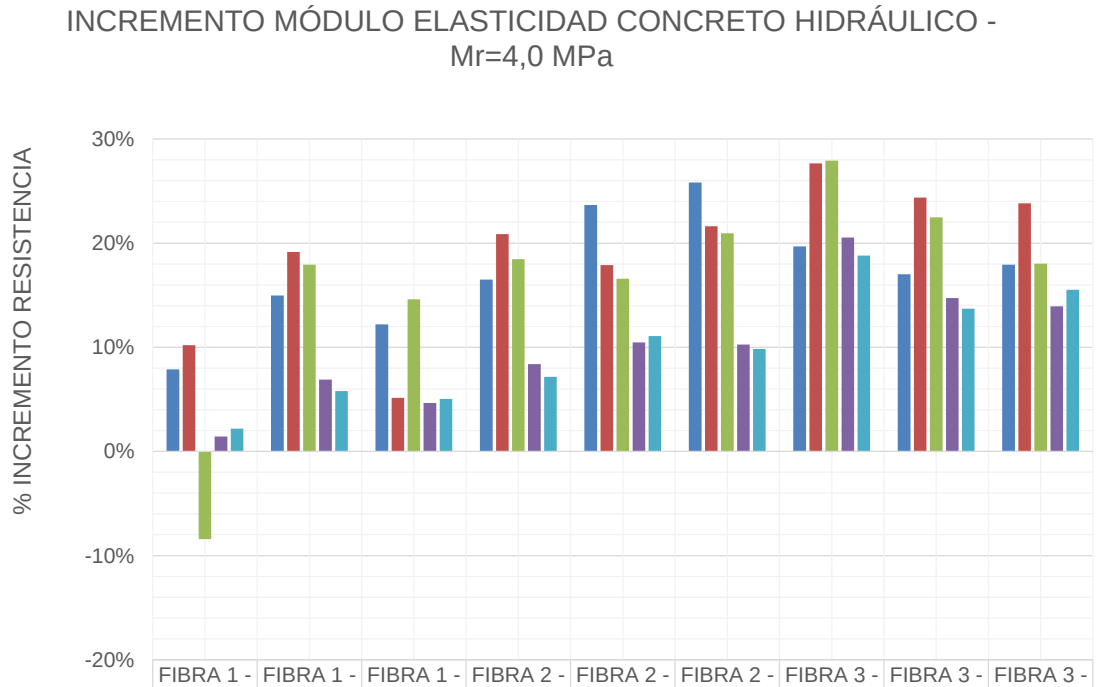


Figura 116. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 117, se muestran los cambios porcentuales del módulo de elasticidad promedio de las probetas modificadas con diferentes fibras y porcentajes con relación a la muestra patrón. De la gráfica se observa que exceptuando la fibra 1 y porcentaje 0.1%, existe un incremento del módulo de elasticidad, sin importar el porcentaje y periodo de curado. Los incrementos son mayores a periodos de curado medios (3, 7 y 14 días) y especialmente para la fibra 3. El mayor incremento (28%) se obtiene para la fibra 3 y dosificación 4%. Sin embargo, si se analiza solamente la resistencia a los 28 y 56 días, se puede evidenciar que la fibra 3, alcanza los incrementos máximos, irrelevantemente el porcentaje utilizado. La menor respuesta de incremento para los periodos de curado de diseño de mezclas de concreto (28 y 56 días), fueron para la fibra 1, con un rango entre 1 y 7%.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	8%	15%	12%	17%	24%	26%	20%	17%	18%
7 DÍAS CURADO	10%	19%	5%	21%	18%	22%	28%	24%	24%
14 DÍAS CURADO	-8%	18%	15%	18%	17%	21%	28%	22%	18%
28 DÍAS CURADO	1%	7%	5%	8%	10%	10%	21%	15%	14%
56 DÍAS CURADO	2%	6%	5%	7%	11%	10%	19%	14%	16%

Figura 117**.** Incrementos del módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

7.7.2 Módulo de elasticidad de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia Mr=4.5 MPa

El comportamiento del módulo de elasticidad de los concretos modificados con fibras 1, 2 y 3, a diferentes dosificaciones (tres porcentajes) y resistencias de diseño 4.5 MPa, se analizarán a continuación. Se resalta que se ejecutaron tres probetas por tipo de fibra, porcentaje de dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellos.

En la figura 118, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan descensos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. Para las adiciones de 0.3%, el módulo de elasticidad a los 28 y 56 días desciende de forma mayor que los otros porcentajes, evidenciando una incidencia directa en la resistencia del material.

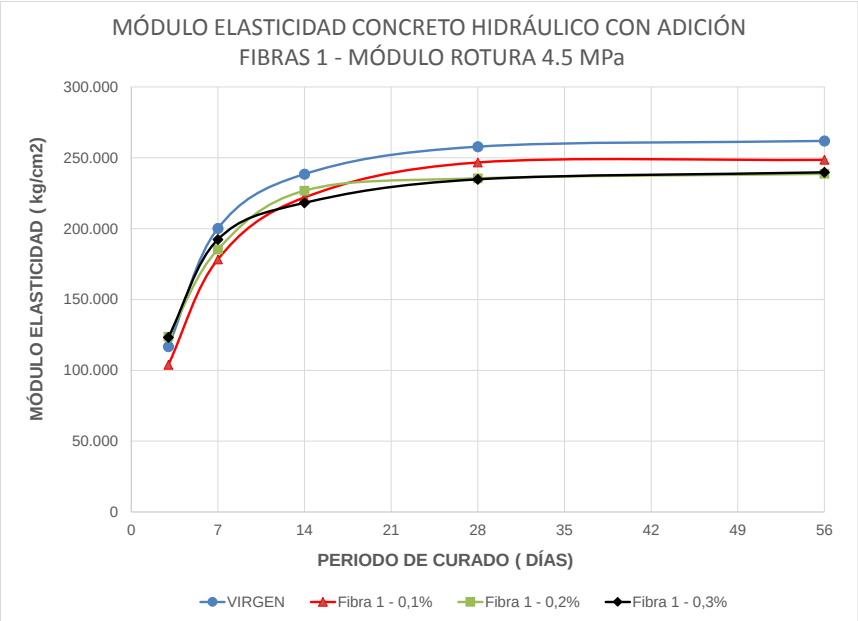


Figura 118. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 119, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan leves descensos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. Los módulos de elasticidad de las probetas con fibras y curados a los 28 y 56 días, son muy similares al adicionar dosificaciones de 0.1% y 0.2%, lo cual pone de manifiesto que no existe una incidencia directa entre el porcentaje de fibra y la respuesta del módulo de elasticidad. Para el caso de la adición de 0.3%, la resistencia a los 28 y 56 días es mayor el descenso, evidenciando la influencia negativa de estas fibras en la resistencia del concreto.

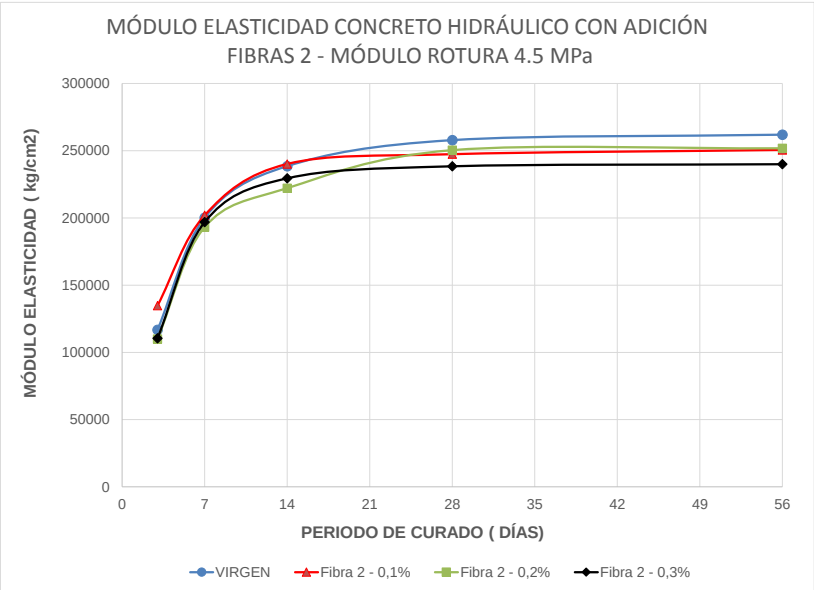


Figura 119. Módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 120, módulo de elasticidad promedio de concretos hidráulicos con adición de fibras tipo 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado, se evidencia que las fibras generan incrementos del módulo de elasticidad, irrelevantemente el periodo de curado y porcentaje introducido. Los módulos de elasticidad de las probetas con fibras y curados a los 28 y 56 días, son muy similares al adicionar 4.0% y 4.5% de fibra, lo cual pone de manifiesto que no existe una incidencia directa entre el porcentaje de fibra y la respuesta del módulo de elasticidad. De otra parte, los mayores valores se obtienen para la dosificación de 4.0% y su incremento esta entre 7% y 13%. Así mismo, se observa que la dosificación mayor (5.0%), no presenta un incremento en la resistencia a periodos de curado de 28 y 56 días.

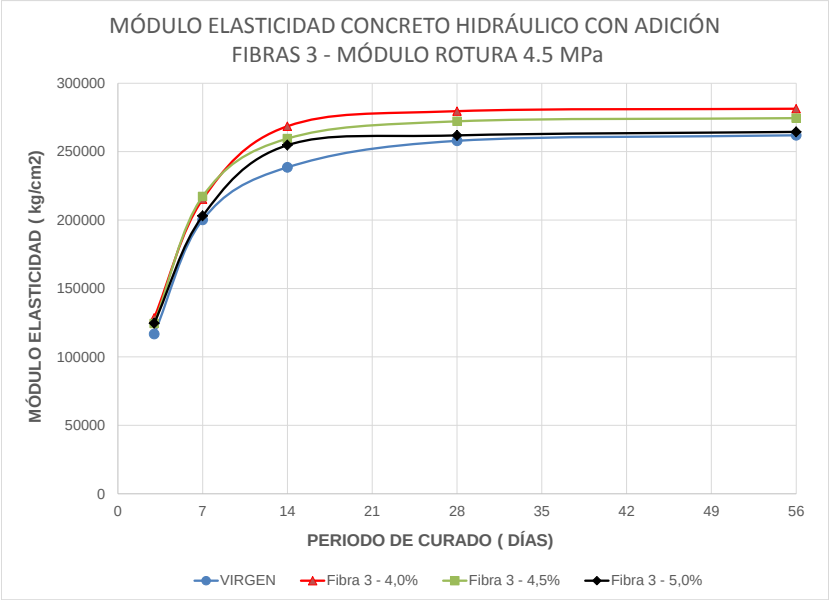
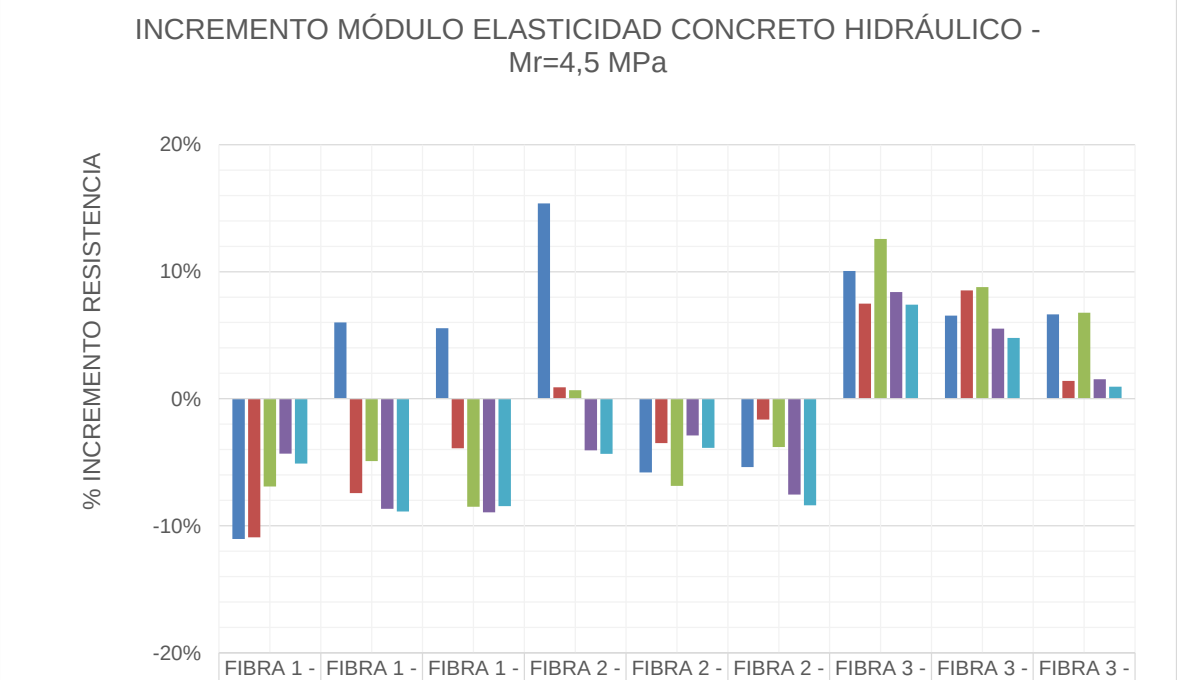


Figura 120. Módulo de elasticidad del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 121, se muestran los cambios porcentuales del módulo de elasticidad promedio de las probetas modificadas con diferentes fibras y porcentajes con relación a la muestra patrón. De la gráfica se observa que la adición de fibras 1 o 2, sin importar la dosificación, generan descensos en el módulo de elasticidad y que solo para tempranas edades de curado (3 días) en oportunidades existe incremento. Sin embargo, el tiempo de curado de referencia para evaluar el comportamiento de los concretos con fibras es 28 o 56 días, periodo donde se evidencia un descenso entre el 4% y 8%. De otra parte, la fibra 3, irrelevantemente su dosificación y periodo de curado, presenta incremento del módulo de elasticidad, los cuales oscilan entre 5% y 13%. Se resalta que la dosificación del 4% de la fibra 3, obtiene las máximas resistencia del módulo de elasticidad, indiferentemente el periodo de curado.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	-11%	6%	6%	15%	-6%	-5%	10%	7%	7%
7 DÍAS CURADO	-11%	-7%	-4%	1%	-3%	-2%	7%	9%	1%
14 DÍAS CURADO	-7%	-5%	-9%	1%	-7%	-4%	13%	9%	7%
28 DÍAS CURADO	-4%	-9%	-9%	-4%	-3%	-8%	8%	6%	2%
56 DÍAS CURADO	-5%	-9%	-8%	-4%	-4%	-8%	7%	5%	1%

Figura 121. Incrementos del módulo de elasticidad promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

Finalmente, al evaluar el módulo de elasticidad del concreto con fibras 1,2 y 3, a diferentes dosificaciones y diseños de resistencia (Mr= 4.0 MPa y 4.5 MPa), se establece que la fibra 3, con una dosificación de 4%, presenta los mayores incrementos, irrelevantemente el diseño de resistencia de la mezcla (Mr= 4.0 MPa y 4.5 MPa). De otra parte, se evidencia que los concretos con resistencia de diseño Mr=4.5 MPa, muestran descensos significativos en el módulo al adicionar fibras 1 y 2 y que con la fibra 3, los incrementos son leves. Caso contrario para los concretos con resistencia de diseño

Mr=4.0 MPa, los cuales aumentan irrelevantemente la fibra y su porcentaje. Estos resultados plantean que las fibras favorecen más los concretos de baja resistencia a la flexión y que la fibra 3, con dosificación 4%, genera el mejor comportamiento al módulo de elasticidad.

7.7.3 Resistencia a la compresión simple de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia de Mr=4.0 MPa.

El comportamiento de la resistencia a la compresión simple de los concretos modificados con fibras 1,2 y 3, tres dosificaciones, diferentes periodos de curado y resistencia de diseño Mr=4.0 MPa, se analizará a continuación. Se resalta que se ejecutaron tres ensayos por cada tipo de fibra, dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellas.

En la figura 122, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento en la resistencia del concreto, la cual varía entre 4% y 30%. Es importante resaltar que los mayores incremento de resistencia (12-30%) se dan a tiempos de curado corto (3 y 7 días), mientras a periodos grandes (28 y 56 días), el aumento de resistencia solo alcanza valores entre 4% y 7%.

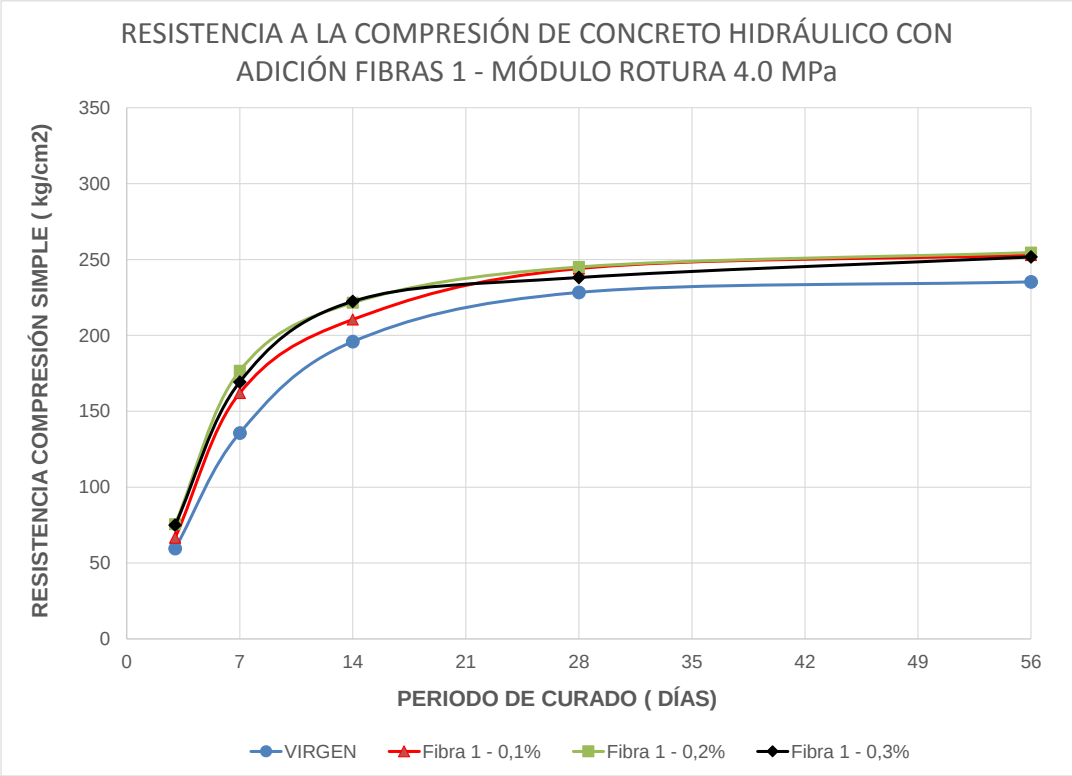


Figura 122. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 123, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe

un incremento significativamente elevado en la resistencia del concreto, la cual varía entre 24 y 44%. Es importante resaltar que los mayores incremento de resistencia se dan a tiempos de curado corto (3 y 7 días), mientras a periodos grandes (28 y 56 días), el aumento de resistencia es levemente menor. Sin embargo, se resalta que la fibra 2 produce un aumento importante en la resistencia del concreto, sin importar el porcentaje utilizado. Su máximo incremento se observa en la dosificación del 0.3%.

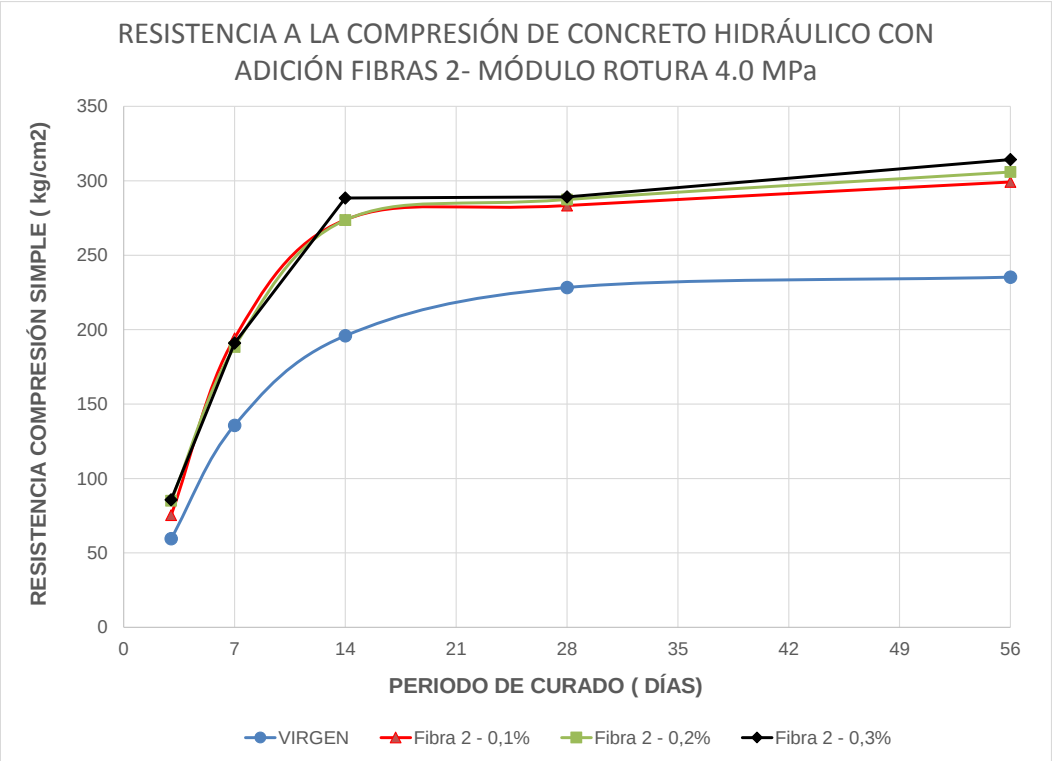


Figura 123.Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 124, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento significativamente elevado en la resistencia del concreto, la cual varía entre 20 y 61%. Es importante resaltar que los mayores incrementos de resistencia se dan a tiempos de curado medios y largos (14,28 y 56 días). De otra parte, se observa para todos los porcentajes utilizados en la investigación, incremento progresivos de la resistencia con el tiempo de curado, para finalmente tener una tendencia estable a los 28 y 56 días de curado. Si bien, es importante resaltar que existen incrementos para todos los porcentajes, la dosificación que produce mayores resistencias es 4%.

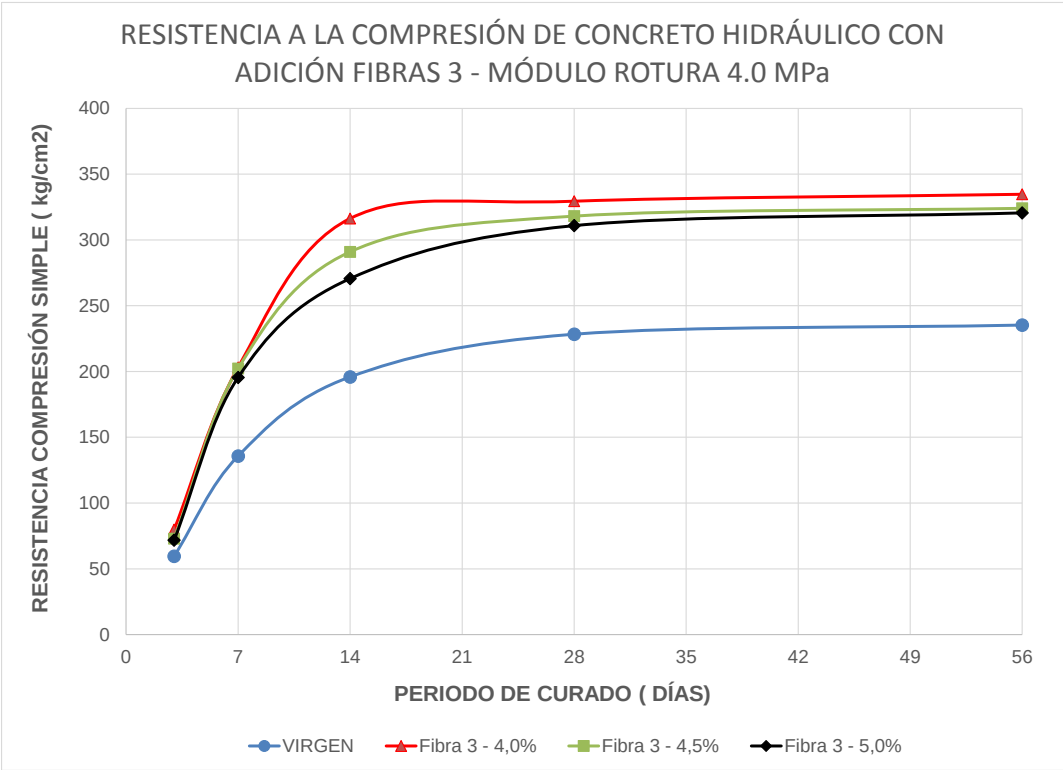
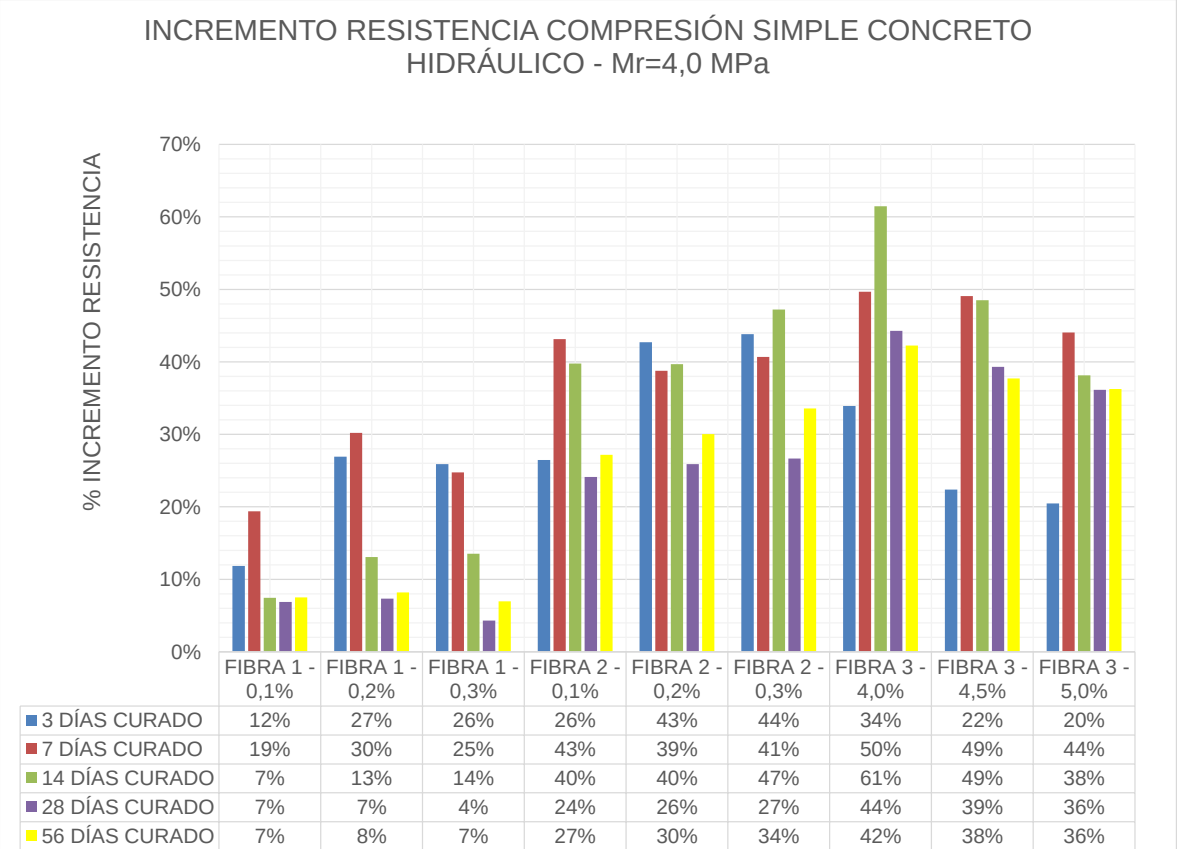


Figura 124. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 125, se observa los incrementos de la resistencia a la compresión simple del concreto modificado con fibras a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento, siendo mayor para las fibra 2 y 3. La dosificación y fibra que genera mayor incremento a 28 días de curado (resistencia final del concreto o de diseño) fue la fibra 3% y 4% de dosificación, con un 44%. Es importante resaltar, que otras dosificaciones para la fibra 3 (4.5% y 5%), obtienen incrementos importantes (36% y 39%). Referente a la incidencia de la fibra 2, sus incrementos oscilan entre 24 y 27%, siendo máximo para 0.3% de dosificación. Finalmente, la fibra 1, presenta incrementos entre 4% y 7%.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	12%	27%	26%	26%	43%	44%	34%	22%	20%
7 DÍAS CURADO	19%	30%	25%	43%	39%	41%	50%	49%	44%
14 DÍAS CURADO	7%	13%	14%	40%	40%	47%	61%	49%	38%
28 DÍAS CURADO	7%	7%	4%	24%	26%	27%	44%	39%	36%
56 DÍAS CURADO	7%	8%	7%	27%	30%	34%	42%	38%	36%

Figura 125. Incremento Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

7.7.4 Resistencia a la compresión simple de concretos hidráulicos modificados con fibras y diseño de resistencia de Mr=4.5 MPa.

El comportamiento de la resistencia a la compresión simple de los concretos modificados con fibras 1,2 y 3, tres dosificaciones, diferentes periodos de curado y resistencia de diseño Mr=4.5 MPa, se analizará a continuación. Se resalta que se ejecutaron tres ensayos por cada tipo de fibra, dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellas.

En la figura 126, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un descenso en la resistencia del concreto. Es importante resaltar que las mayores pérdidas de resistencia (20%), irrelevantemente el periodo de curado, se dan para la dosificación del 0.1%. De otra parte, se evidencia que la resistencia entre los periodos de curado de 28 y 56 días, no se incrementan significativamente, mostrando una estabilidad de la resistencia con el tiempo.

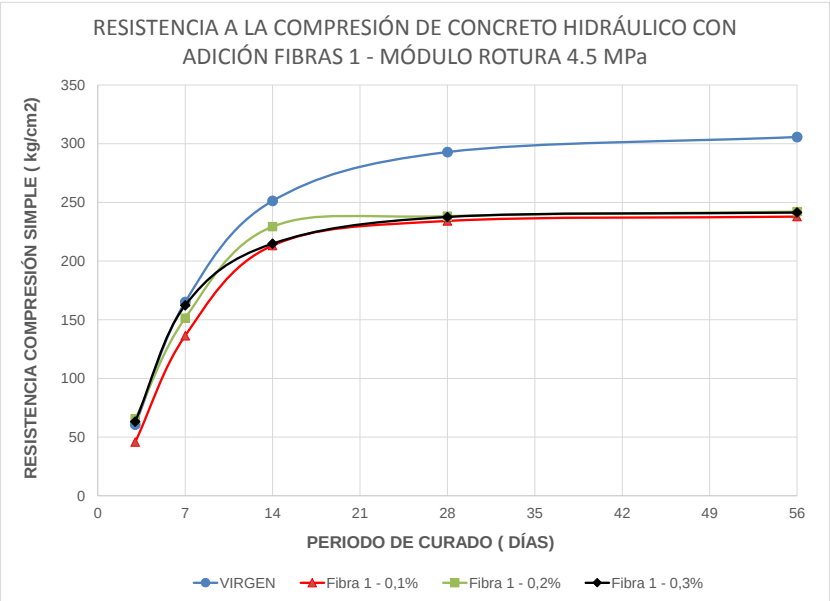


Figura 126.Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 127, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el periodo de curado y porcentajes de fibra al 0.2% y 0.3%, existe un descenso en la resistencia del concreto. En el caso de la dosificación de 0.1%, su comportamiento es casi similar a la muestra patrón. De otra parte, se evidencia que la resistencia entre los periodos de curado de 14 y 28 días y dosificaciones de 0.2% y 0.3%, no existen incrementos significativos, mostrando una estabilidad de la resistencia con el tiempo. Así mismo, para la dosificación 0.3%, la resistencia relativa entre 14,28 y 56 días de curado, fue negativa.

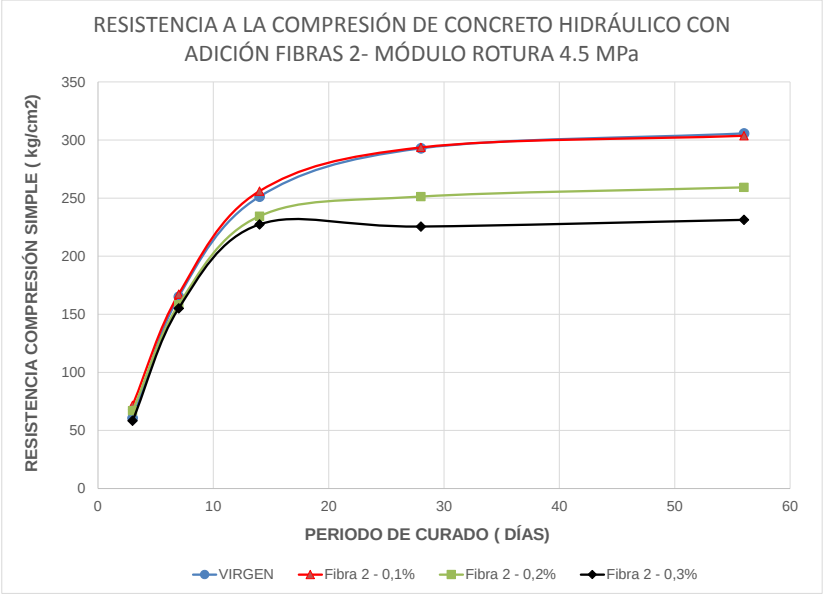


Figura 127. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 128, se observa la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibra 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el periodo de curado y porcentajes de fibra utilizado, existe un incremento en la resistencia, las cuales oscilan entre 3% y 17%. De igual manera, se evidencia que la dosificación al 4.0%, presenta los mayores incrementos de resistencia (10% al 17%). Se resalta que los incrementos para las dosificaciones de 4.5% y 5.0%, son relativamente iguales, sin importar el periodo de curado.

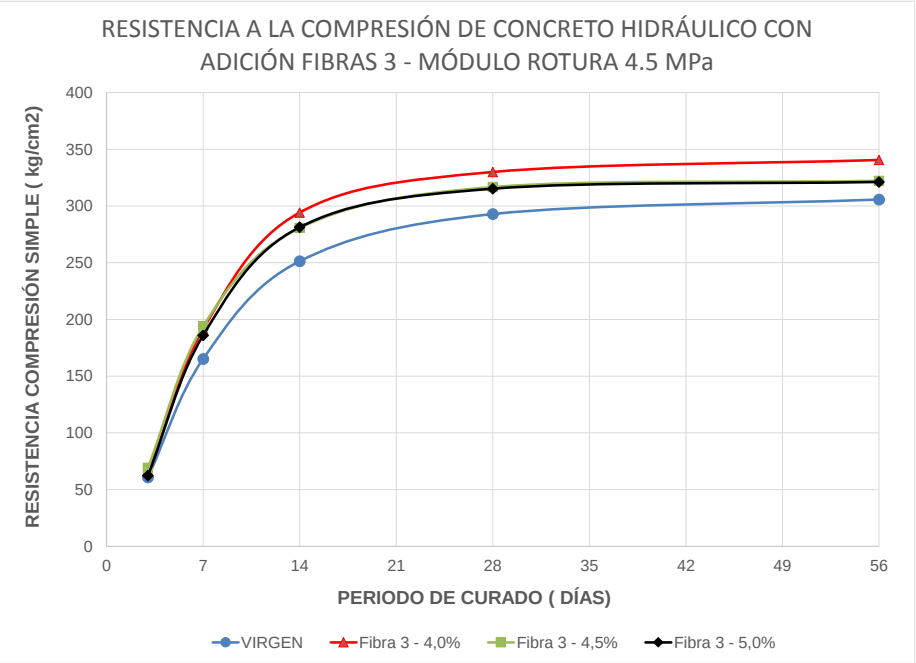
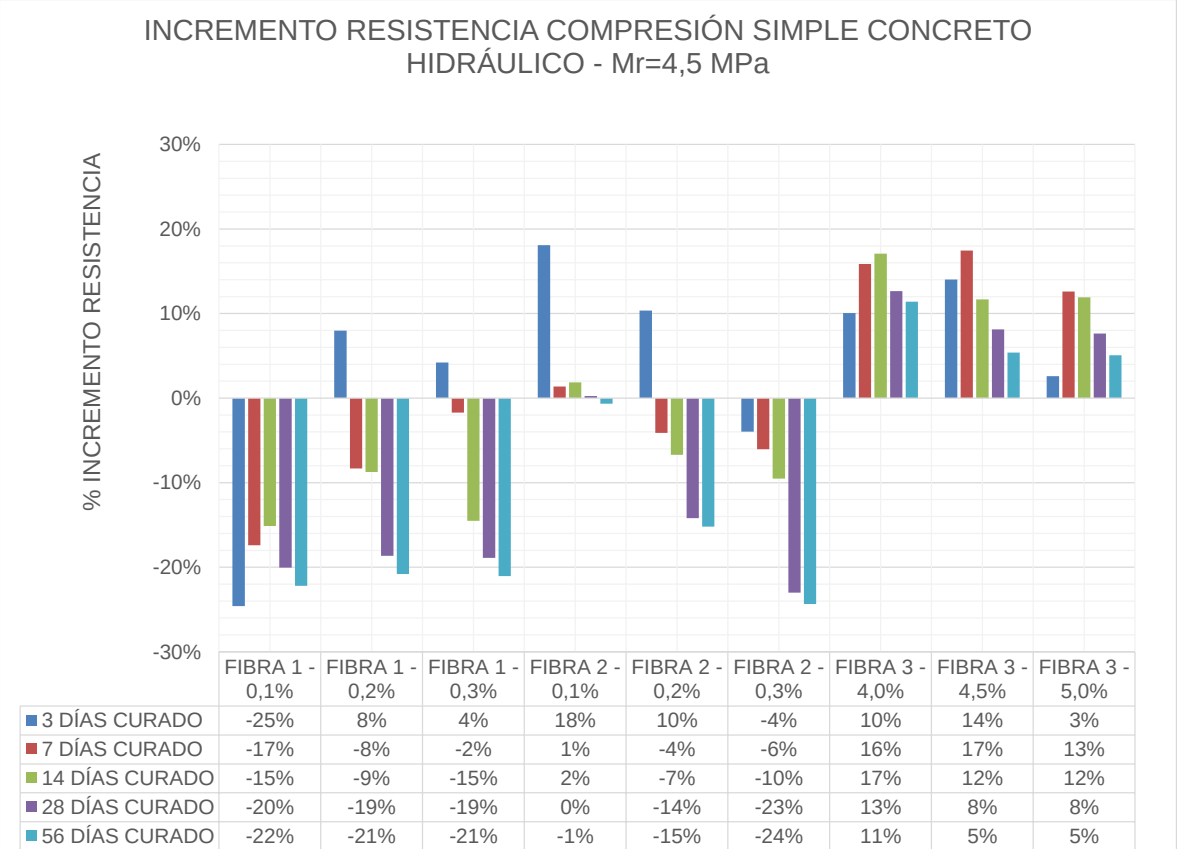


Figura 128. Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 129, se observa los incrementos de la resistencia promedio a la compresión simple del concreto modificado con fibras a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, la fibra 3 genera incrementos en la resistencia, especialmente para la dosificación del 4.0%. De otra parte, la adición de fibras 1 y 2, sin importar la dosificación, producen descensos en la resistencia, especialmente para el periodo de 28 y 56 días (resistencia final del concreto o de diseño).

Finalmente, el comportamiento de la resistencia a la compresión simple de concretos modificados con fibras de diferente origen, dosificación y diseño de mezcla (Mr=4.0 MPa y Mr=4.5 MPa), evidencia que la adición de fibras sin importar sus características y dosificación, presenta incrementos de resistencia para los concretos de diseños de mezcla Mr= 4.0 MPa. De otra parte, los concretos con diseños de resistencia de Mr=4.5 MPa, solo muestran incrementos con la adición de fibras 3. Estos resultados muestran que para bajas resistencias de diseño (Mr=4.0 MPa), la adición de fibras, sin importar su origen, incrementan sus propiedades, mientras para las resistencias altas (Mr=4.5 MPa), su incidencia es negativa para las fibras 1 y 2 y positiva para la fibra 3.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	-25%	8%	4%	18%	10%	-4%	10%	14%	3%
7 DÍAS CURADO	-17%	-8%	-2%	1%	-4%	-6%	16%	17%	13%
14 DÍAS CURADO	-15%	-9%	-15%	2%	-7%	-10%	17%	12%	12%
28 DÍAS CURADO	-20%	-19%	-19%	0%	-14%	-23%	13%	8%	8%
56 DÍAS CURADO	-22%	-21%	-21%	-1%	-15%	-24%	11%	5%	5%

Figura 129. Incrementos Resistencia promedio a la compresión del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

7.7.5 Resistencia al módulo de rotura de concretos hidráulicos con Mr=4.0 MPa.

El comportamiento del módulo de rotura de los concretos modificados con fibras 1, 2 y 3, tres dosificaciones, diferentes periodos de curado y resistencia de diseño Mr=4.0 MPa, se analizará a continuación. Se resalta que se ejecutaron dos ensayos por cada tipo de fibra, dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellas.

En la figura 130, se observa el módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibra 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento en el módulo de rotura del concreto, especialmente para la dosificación de 0.2%. Es importante resaltar que la evolución del módulo de rotura con los periodos de curado es similar para las diferentes dosificaciones y muestra patrón (sin fibras), evidenciando la homogeneidad del módulo de rotura del concreto al adicionarle fibras.

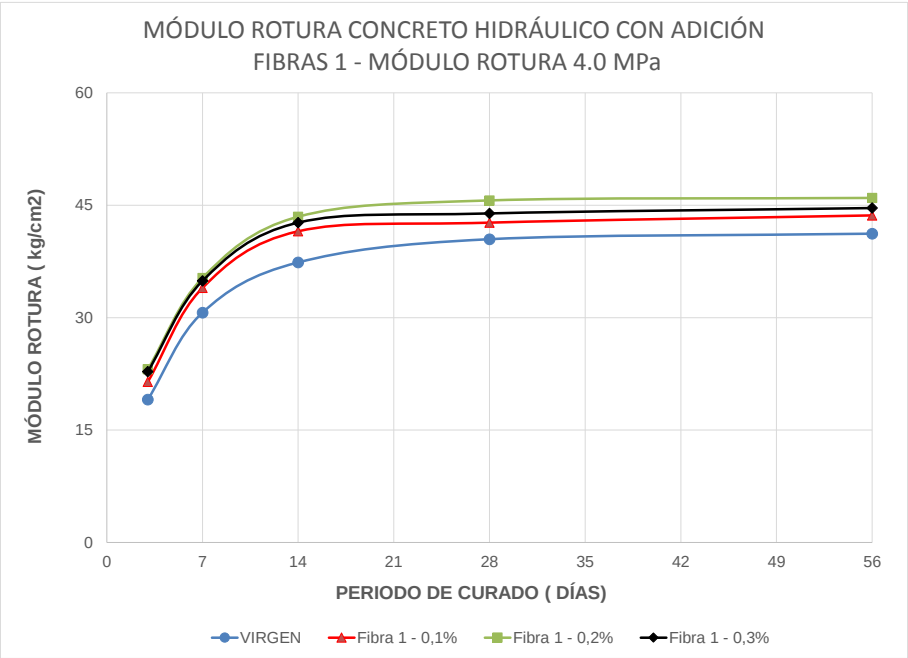


Figura 130. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 131, se observa el módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibra 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento en el módulo de rotura del concreto y que la dosificación no presenta cambios diferenciales en el módulo. Es importante resaltar, que a mayor dosificación de fibras, el módulo aumenta.

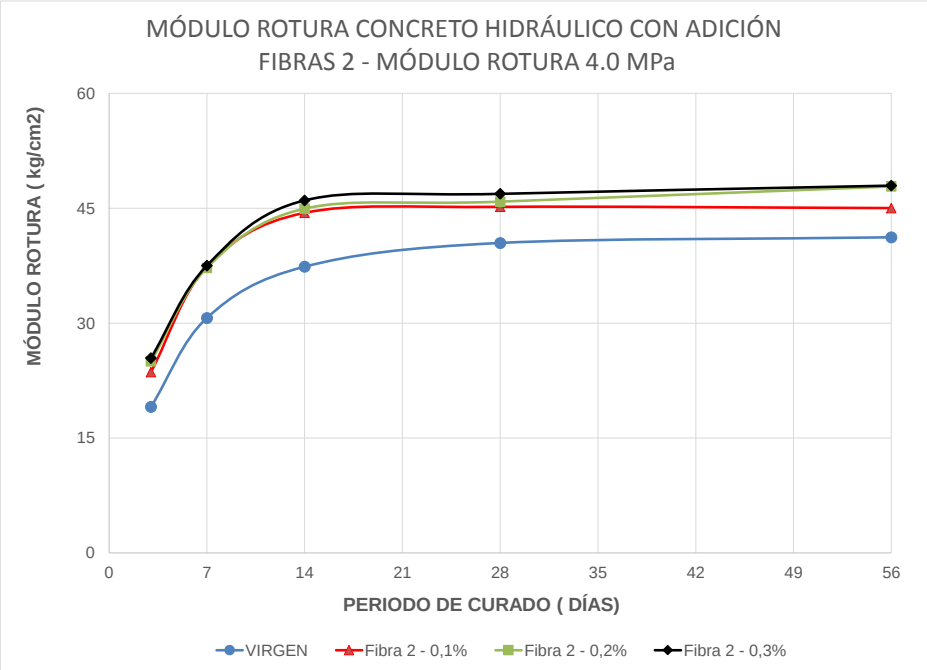


Figura 131. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 132, se observa el módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibra 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento significativo en el módulo de rotura del concreto (18-27%) y que la dosificación no presenta cambios diferenciales en el módulo. Es importante resaltar, que el máximo módulo de rotura, sin importar el periodo de curado lo produce la dosificación del 4.0%. De otra parte, las dosificaciones 4.5% y 5.0%, presentan módulos de rotura similares sin importar el periodo de curado.

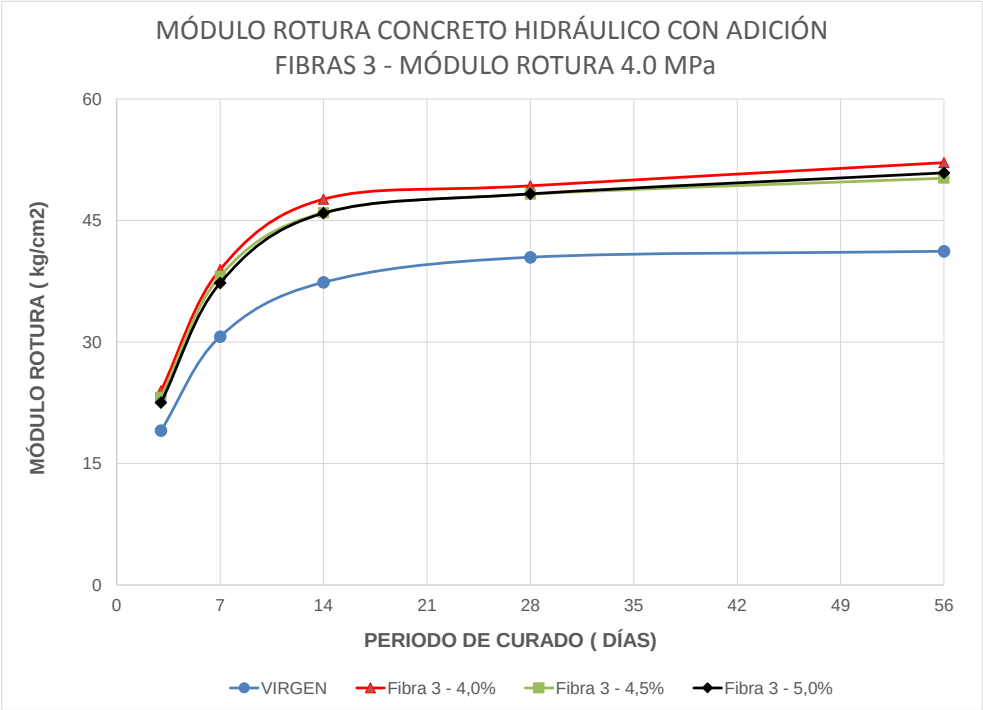
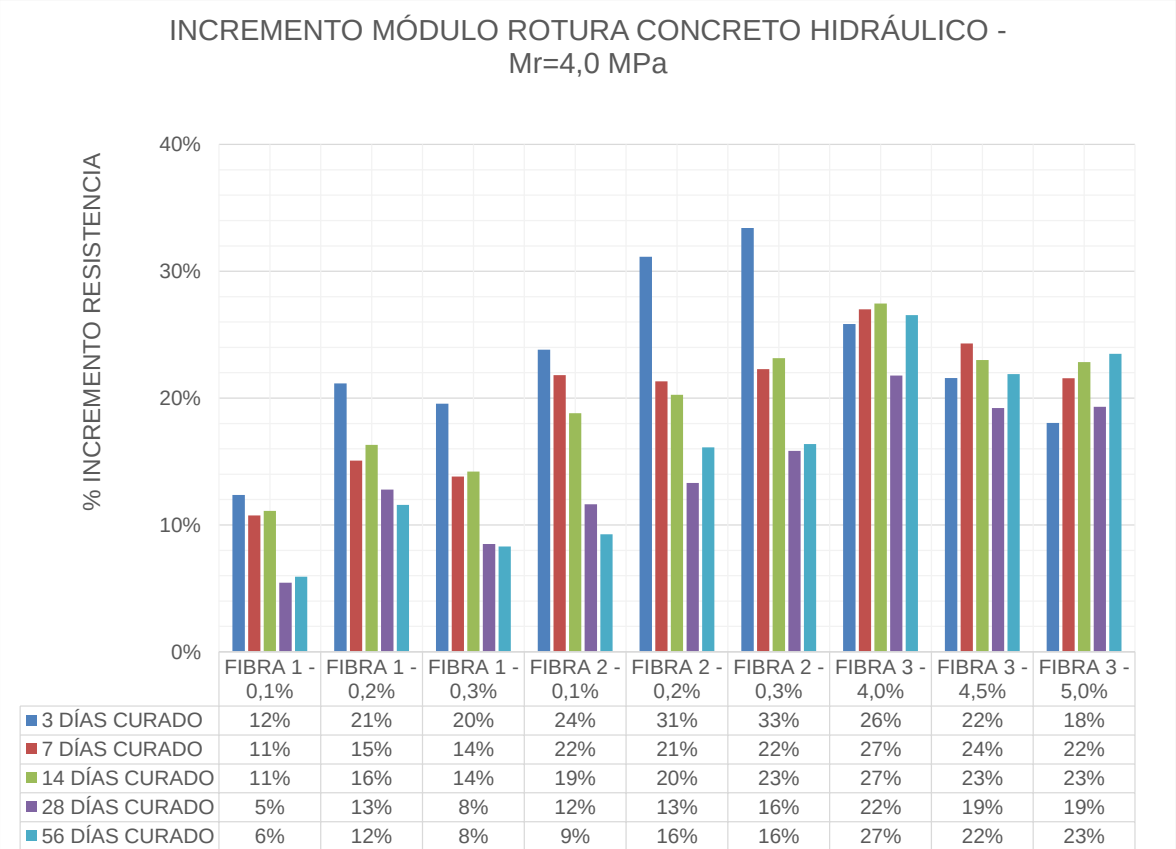


Figura 132. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

En la figura 133, se observa los incrementos del módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibras a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento, siendo mayor para las fibra 2 y 3. La dosificación y fibra que genera mayor incremento a 28 días de curado (resistencia final del concreto o de diseño) fue la fibra 3 y 4% de dosificación, con un 22%. Es importante resaltar, que otras dosificaciones para la fibra 3 (4.5% y 5%), obtienen incrementos importante de 19%. Referente a la incidencia de la fibra 2, sus incrementos oscilan entre 12% y 16%, siendo máximo para 0.3% de dosificación. Finalmente, la fibra 1, presenta incrementos entre 5% y 13%.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	12%	21%	20%	24%	31%	33%	26%	22%	18%
7 DÍAS CURADO	11%	15%	14%	22%	21%	22%	27%	24%	22%
14 DÍAS CURADO	11%	16%	14%	19%	20%	23%	27%	23%	23%
28 DÍAS CURADO	5%	13%	8%	12%	13%	16%	22%	19%	19%
56 DÍAS CURADO	6%	12%	8%	9%	16%	16%	27%	22%	23%

Figura 133. Incrementos del módulo rotura del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.0 MPa.

7.7.6 Resistencia al módulo de rotura de concretos hidráulicos con Mr=4.5 MPa.

El comportamiento del módulo de rotura de los concretos modificados con fibras 1,2 y 3, tres dosificaciones, diferentes periodos de curado y resistencia de diseño Mr=4.5 MPa, se analizará a continuación. Se resalta que se ejecutaron dos ensayos por cada tipo de fibra, dosificación y periodo de curado y que el análisis se realizó sobre el promedio de ellas.

En la figura 134, se observa el módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibra 1 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento en el módulo de rotura del concreto, especialmente para la dosificación de 0.2%. Es importante resaltar que la evolución del módulo de rotura con los periodos de curado es similar para las diferentes dosificaciones y muestra patrón (sin fibras), evidenciando la homogeneidad del módulo de rotura del concreto al adicionarle fibras.

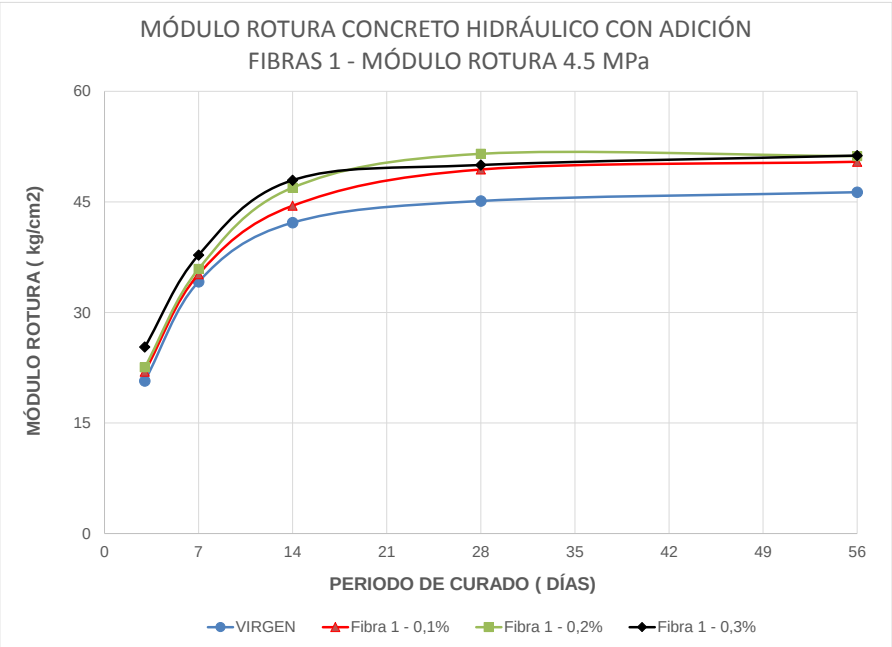


Figura 134. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 1 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

En la figura 135, se observa el módulo de rotura del concreto modificado con fibra 2 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento en el módulo de rotura del concreto y que la dosificación 0.1%, presente el valor máximo sin importar el periodo de curado. De otra parte, las dosificaciones 0.2 y 0.3%, tienen módulo de rotura similares, pero mayores a la muestra patrón.

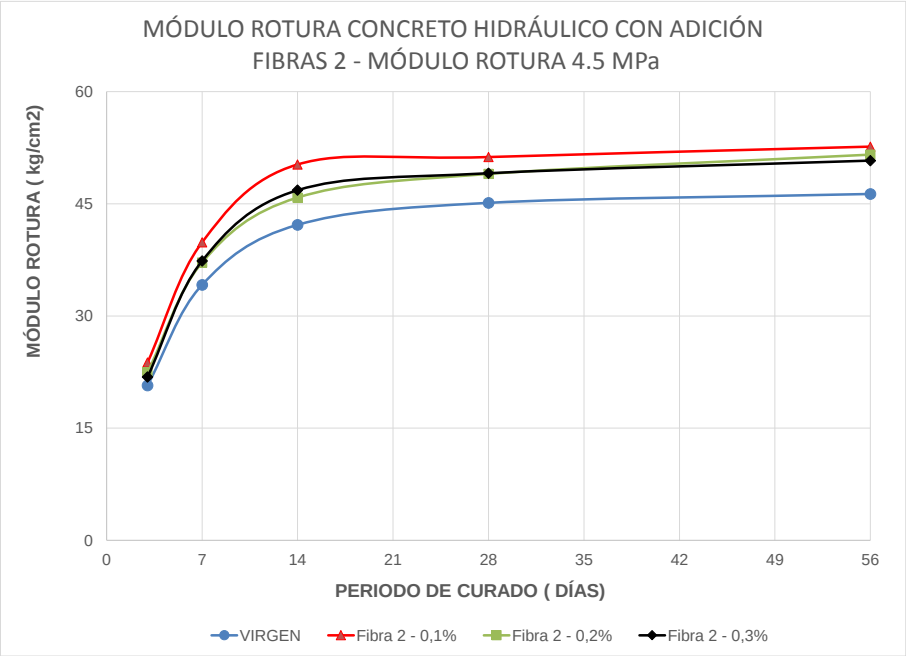


Figura 135. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 2 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

De la figura 136, se observa el módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibra 3 a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento significativo en el módulo de rotura del concreto (8-29%), especialmente para las dosificaciones 4.0% y 4.5%. Es importante resaltar que la evolución del módulo de rotura con los periodos de curado es similar para las diferentes dosificaciones y muestra patrón (sin fibras), evidenciando la homogeneidad del módulo de rotura del concreto al adicionarle fibras.

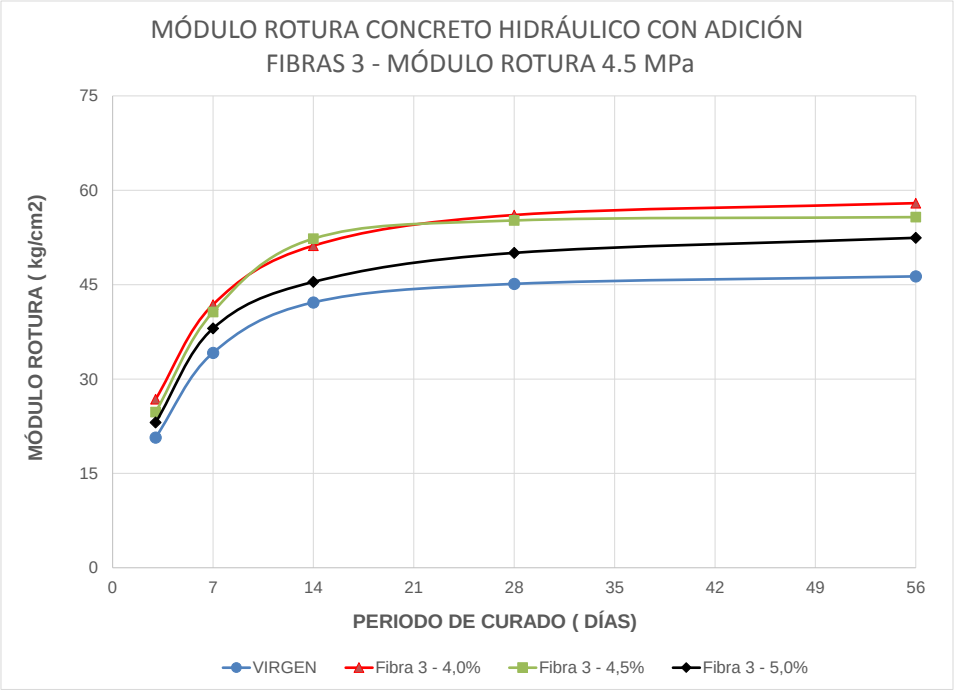
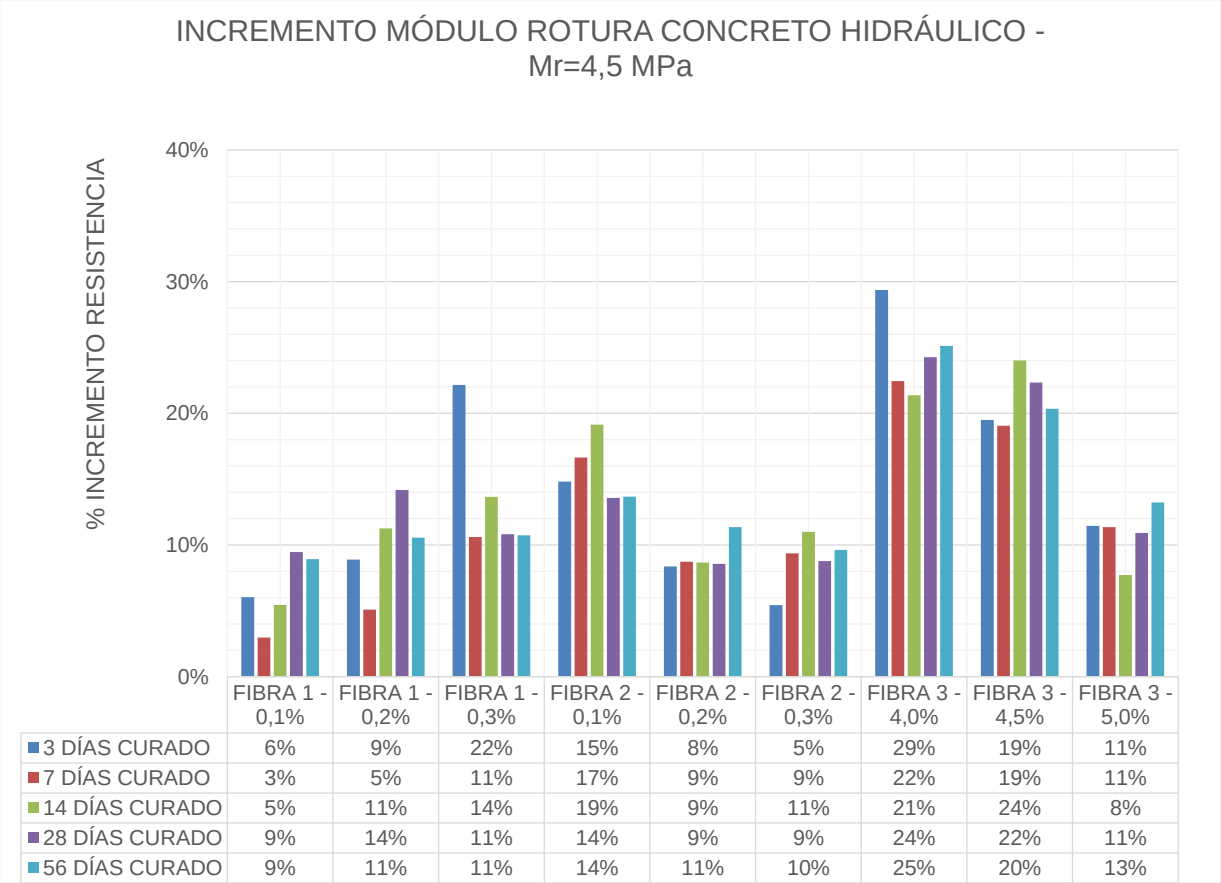


Figura 136. Módulo rotura promedio del concreto con adición fibras 3 y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

De la figura 137, se observa los incrementos del módulo de rotura promedio del concreto modificado con fibras a diferentes porcentajes y periodos de curado. De las curvas se evidencia que irrelevantemente el porcentaje de fibra utilizada y periodo de curado, existe un incremento, siendo mayor para las fibra 2 y 3. La dosificación y fibra que genera mayor incremento a 28 días de curado (resistencia final del concreto o de diseño) fue la fibra 3% y 4% de dosificación, con un 24%. Es importante resaltar, que otras dosificaciones para la fibra 3 (4.5% y 5%), obtienen incrementos importante de 11% y 22%. Referente a la incidencia de la fibra 1 y 2, sus incrementos oscilan entre 9% y 14%, siendo máximo para 0.2% de dosificación de la fibra 1% y 0.1% de dosificación de la fibra 2.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,1%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 3 - 4,0%	FIBRA 3 - 4,5%	FIBRA 3 - 5,0%
3 DÍAS CURADO	6%	9%	22%	15%	8%	5%	29%	19%	11%
7 DÍAS CURADO	3%	5%	11%	17%	9%	9%	22%	19%	11%
14 DÍAS CURADO	5%	11%	14%	19%	9%	11%	21%	24%	8%
28 DÍAS CURADO	9%	14%	11%	14%	9%	9%	24%	22%	11%
56 DÍAS CURADO	9%	11%	11%	14%	11%	10%	25%	20%	13%

Figura 137. Incrementos módulo rotura promedio del concreto con adición fibras y diseño de módulo rotura 4.5 MPa.

Finalmente, el comportamiento de módulo de rotura para concretos modificados con fibras de diferente origen, dosificación y diseño de mezcla (Mr=4.0 MPa y Mr=4.5 MPa), evidencia que sin importar las características, dosificación y diseño de mezcla (Mr=4.0 MPa y Mr=4.5 MPa) presenta incrementos, siendo mayores para la fibra 3 y diseño de mezcla Mr=4.0 MPa y que es más favorable el uso de fibras cuando la resistencia de diseño es menor, apra este caso de Mr=4.0 MPa.

7.8 Comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras.

El comportamiento mecánico y dinámico de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras, se evaluará mediante los ensayos de módulo resiliente, deformación plástica, resistencia conservada y leyes de fatiga. A continuación se analizaran los resultados obtenidos de los ensayos ejecutados.

7.8.1 Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras.

En la figura 138, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que las fibras sin importar la dosificación utilizada, disminuyen la deformación plástica, irrelevantemente los puntos de control (tiempo de ensayo). De otra parte, la dosificación de 0.1% produce las mayores reducciones en la deformación. Referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se establece que la dosificación 0.1% presenta una disminución de 4.79%. Las otras dos dosificaciones aunque reducen la deformación total, en la pendiente se observa un incremento respectivo de 8 y 48%.

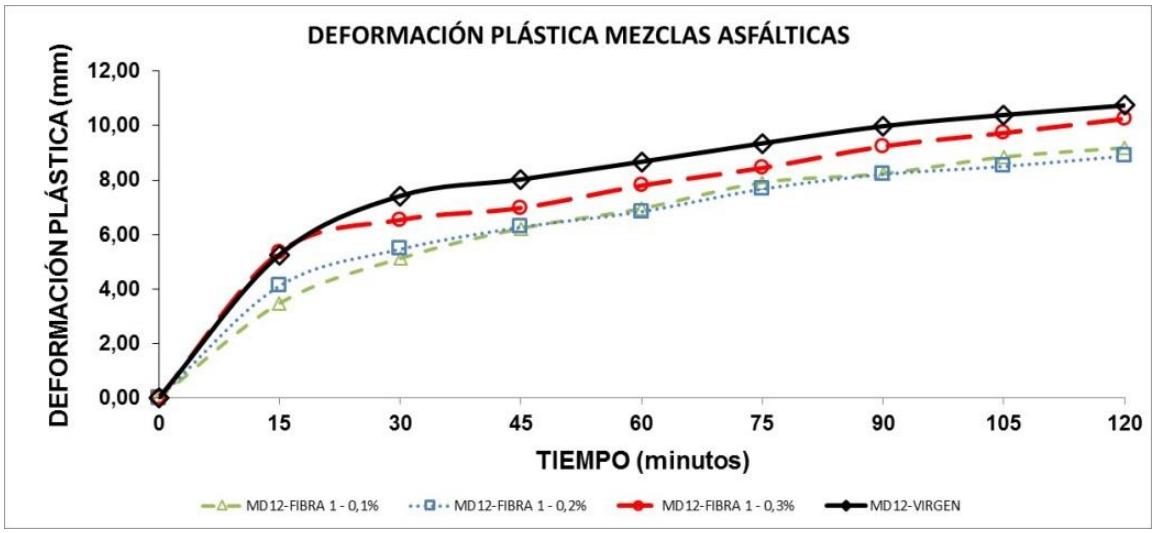


Figura 138. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 1.

En la figura 139, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que las fibras sin importar la dosificación utilizada, disminuyen la deformación plástica, irrelevantemente los puntos de control (tiempo de ensayo). De otra parte, la dosificación de 0.3% produce las mayores reducciones en la deformación. Referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se establece que las tres dosificación presenta disminuciones, siendo la más favorable 0.3, con un 20.29%. Las otras dos dosificaciones reducen la pendiente, pero en porcentajes menores (9% al 12%)

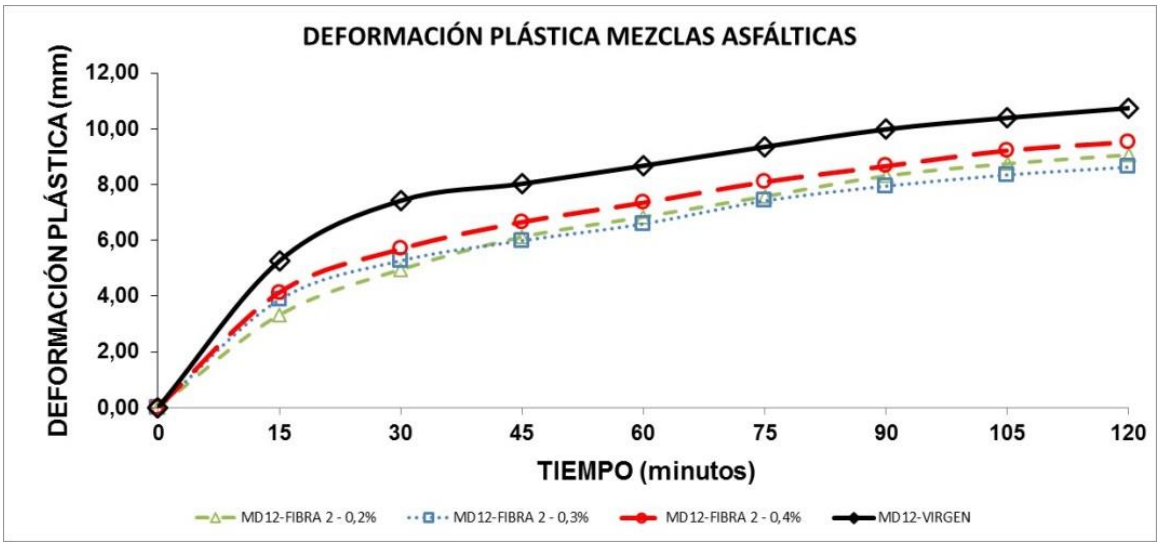


Figura 139. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 2.

En la figura 140, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que las fibras sin importar la dosificación utilizada, disminuyen la deformación plástica de manera similar, irrelevantemente los puntos de control (tiempo de ensayo). Referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se establece que las tres dosificación presenta disminuciones, siendo la más favorable 0.05%, con un 25.71%.

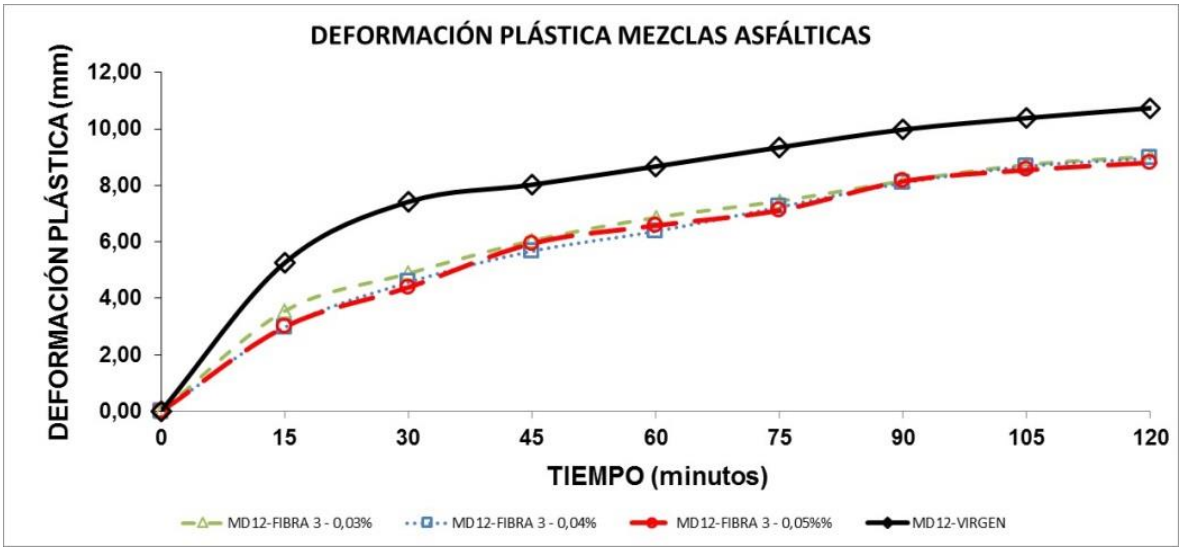


Figura 140. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras 3.

7.8.2 Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con y sin adición de fibras.

En la figura 141, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que las fibras sin importar la dosificación utilizada no aportan a disminuir la deformación plástica. De otra parte, referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se observa que aumenta para 0.2% y 0.3% y la disminución a 0.1% del 7.61%.

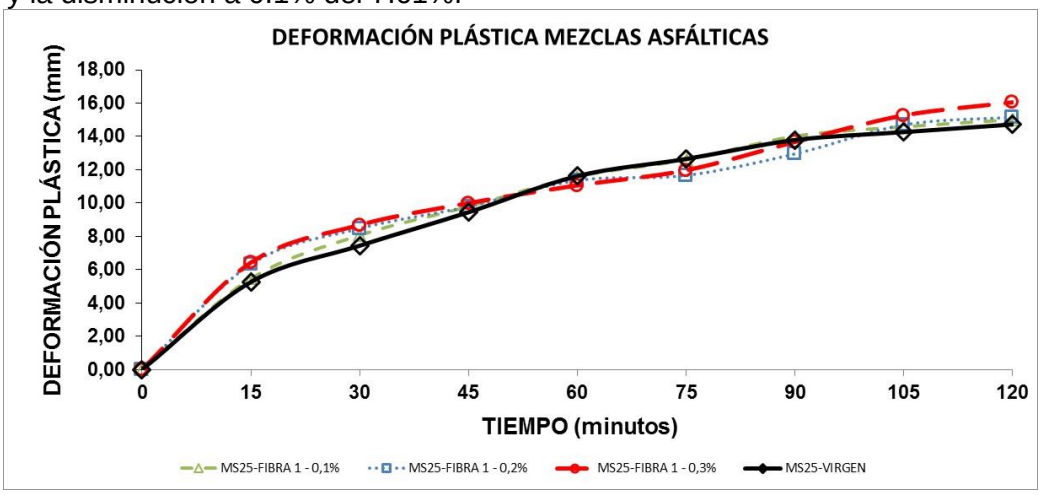


Figura 141. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 1.

En la figura 142, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que la dosificación 0.3%, disminuye la deformación plástica total, mientras las dosificaciones 0.2% y 0.4%, la incrementan. De otra parte, referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se observa que irrelevantemente la dosificación, la pendiente disminuye entre 5% y 11%, siendo más favorable para la dosificación del 0.4%.

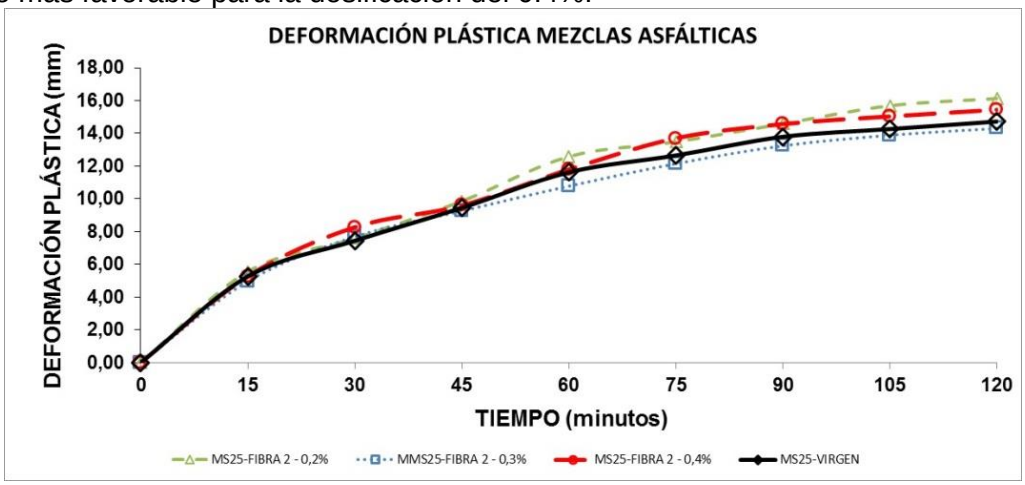


Figura 142. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 2.

En la figura 143, se observa la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes. De las curvas de los ensayos, se evidencia que las fibras sin importar la dosificación utilizada, disminuyen la deformación plástica de manera similar, irrelevantemente los puntos de control (tiempo de ensayo). Referente a la velocidad de deformación determinada en los últimos 15 minutos del ensayo, se establece que las tres dosificación presenta disminuciones, siendo la más favorable 0.05%, con un 14.57%.

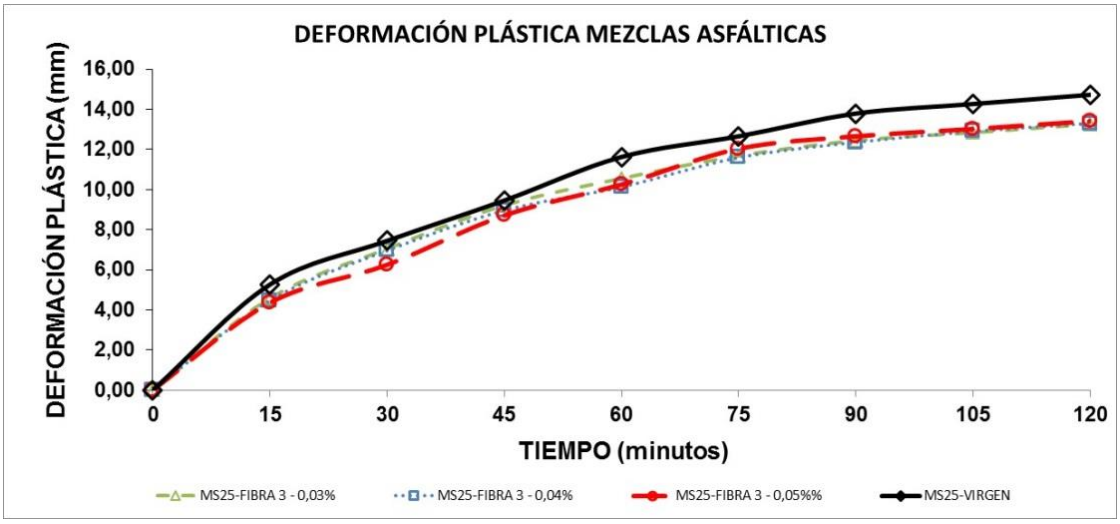


Figura 143. Resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras 3.

De la figura 144, incremento de la pendiente en el ensayo de deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras, se evidencia que las fibras 2 y 3, irrelevantemente su dosificación, disminuyen la pendiente y favorecen el comportamiento de las mezclas. Los resultados alcanzados con la fibra 1, muestras que para dosificaciones de 0.2% y 0.3%, la pendiente aumenta., desfavoreciendo el desempeño de la mezcla.

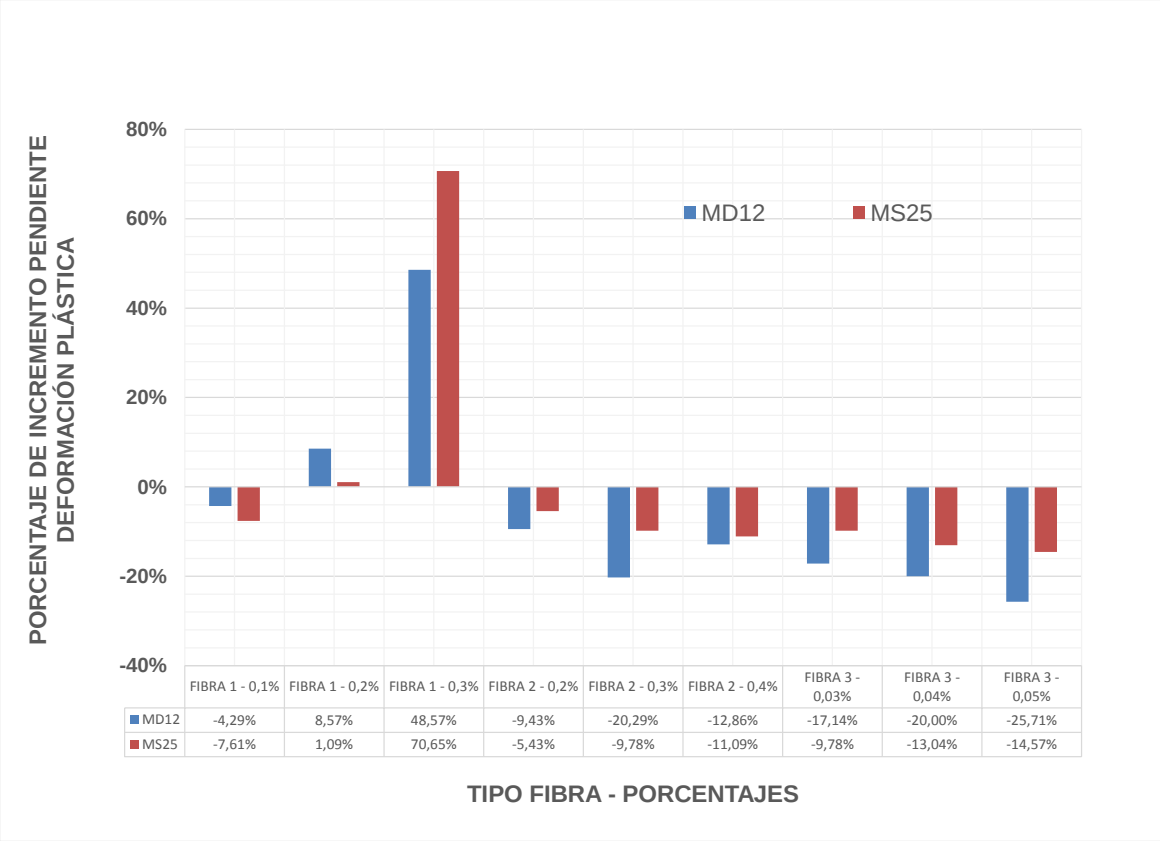


Figura 144. Incremento resistencia a la deformación plástica de mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras.

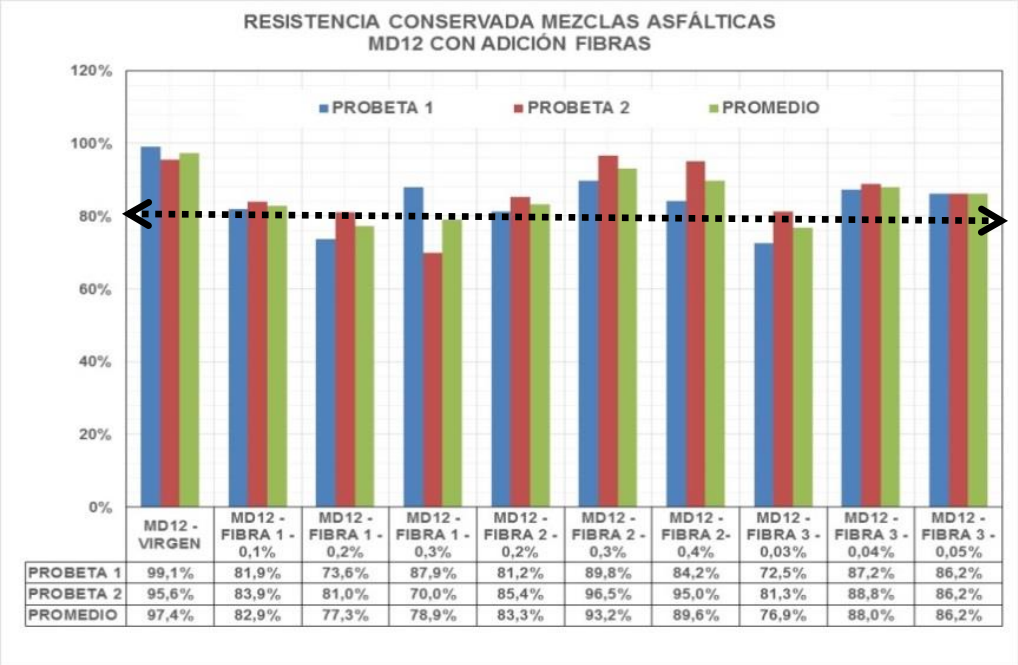
Finalmente, se evidencia que la fibra 2 y 3, irrelevantemente su dosificación o tipo de mezcla asfáltica estudiada (MD12 y MS25), disminuye la pendiente de deformación. Los mejores valores de descenso en la pendiente, son obtenidos para la fibra 3 y dosificación del 0.05%.

7.8.3 Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras

La evaluación de la resistencia conservada en mezclas asfálticas en caliente (MD12 y MS25) se establece mediante la relación de las resistencias a la tracción indirecta entre estado húmedo y seco, el cual debe ser mínimo del 80%, según especificaciones técnicas del IDU (ET-IDU-2011).

En la figura 145, resistencia conservada promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1,2 y 3 y a diferentes dosificaciones, se observa que la muestra patrón tiene un valor superior al 80%, requisito mínimo establecido en las especificaciones del IDU. Referente a las mezclas asfálticas modificadas con fibras de diferente origen y dosificación, se evidencia que solamente la fibra 2, irrelevantemente la dosificación, cumple el requerimiento de tener un valor superior al 80%. Así mismo, la fibra 3, en la dosificación de 0.04% y 0.05%. Respecto a la fibra 1, esta presenta valores inferiores al 80% para las dosificaciones de 0.2% y 0.3%,

mientras para el porcentaje de 0.1% es levemente superior a 80%. Estos resultados evidencian que las fibras inciden en la resistencia conservada de la mezcla estudiada (MD12), haciéndola más susceptible al agua.

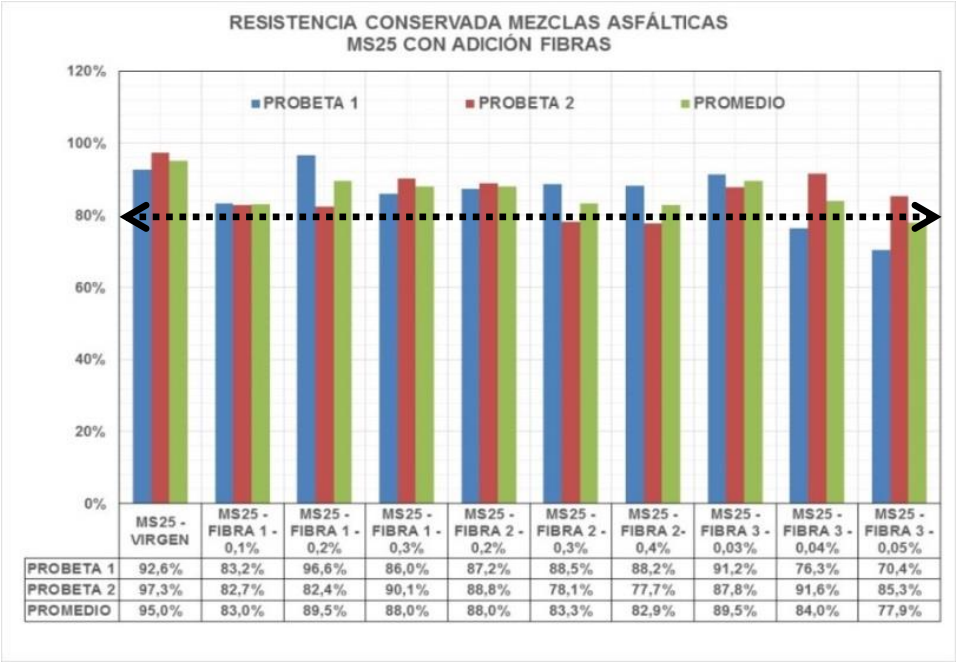


	MD12 - VIRGEN	MD12 - FIBRA 1 - 0,1%	MD12 - FIBRA 1 - 0,2%	MD12 - FIBRA 1 - 0,3%	MD12 - FIBRA 2 - 0,2%	MD12 - FIBRA 2 - 0,3%	MD12 - FIBRA 2- 0,4%	MD12 - FIBRA 3 - 0,03%	MD12 - FIBRA 3 - 0,04%	MD12 - FIBRA 3 - 0,05%
PROBETA 1	99,1%	81,9%	73,6%	87,9%	81,2%	89,8%	84,2%	72,5%	87,2%	86,2%
PROBETA 2	95,6%	83,9%	81,0%	70,0%	85,4%	96,5%	95,0%	81,3%	88,8%	86,2%
PROMEDIO	97,4%	82,9%	77,3%	78,9%	83,3%	93,2%	89,6%	76,9%	88,0%	86,2%

Figura 145. Incremento Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MD12 con adición de fibras.

7.8.4 Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras

En la figura 146, resistencia conservada promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1,2 y 3 y a diferentes porcentajes, se observa que la resistencia de la muestra patrón tiene un valor superior al 80%, requisito mínimo establecido en las especificaciones técnicas del IDU (ET-IDU-2011). Referente a las muestras modificadas con fibras, se observa que únicamente la fibra 3, con dosificación 0.05%, no cumple el requerimiento de tener un valor superior al 80%. Sin embargo, se resalta que uno de los dos ensayos si cumple y el otro no, razón por la cual el promedio es inferior a lo estipulado en la especificación. Finalmente, se observa que las fibras inciden levemente en la resistencia a la susceptibilidad del agua, al reducir sus valores.



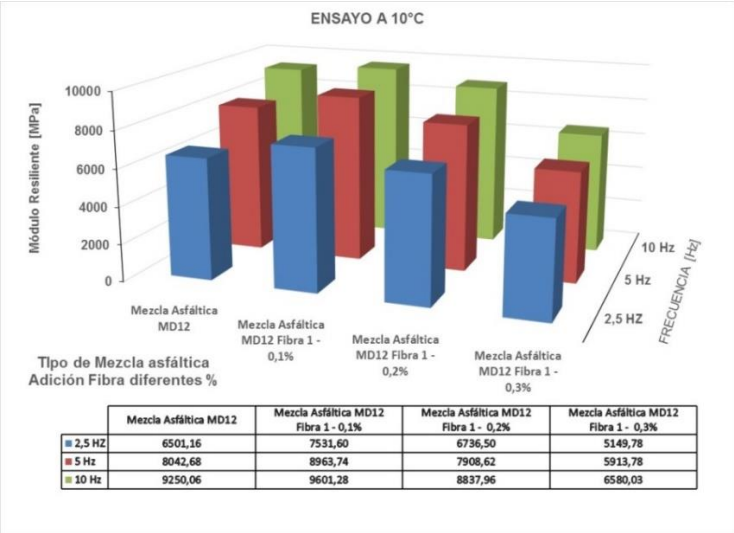
	MS25 - VIRGEN	MS25 - FIBRA 1 - 0,1%	MS25 - FIBRA 1 - 0,2%	MS25 - FIBRA 1 - 0,3%	MS25 - FIBRA 2 - 0,2%	MS25 - FIBRA 2 - 0,3%	MS25 - FIBRA 2- 0,4%	MS25 - FIBRA 3 - 0,03%	MS25 - FIBRA 3 - 0,04%	MS25 - FIBRA 3 - 0,05%
PROBETA 1	92,6%	83,2%	96,6%	86,0%	87,2%	88,5%	88,2%	91,2%	76,3%	70,4%
PROBETA 2	97,3%	82,7%	82,4%	90,1%	88,8%	78,1%	77,7%	87,8%	91,6%	85,3%
PROMEDIO	95,0%	83,0%	89,5%	88,0%	88,0%	83,3%	82,9%	89,5%	84,0%	77,9%

Figura 146. Incremento Resistencia conservada de mezclas asfálticas con granulometría MS25 con adición de fibras.

7.8.5 Módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras

El comportamiento del módulo resiliente de las mezclas asfálticas con granulometría MD12, modificadas con fibras 1, 2 y 3, dosificadas a diferentes porcentajes y ensayadas a diferentes frecuencias (2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz) y diferentes temperaturas (10°C, 15°C, 20°C y 25°C), se analizarán a continuación. Se Resalta que se ejecutaron cinco ensayos por tipo de fibra, dosificación, frecuencia y temperatura y que el análisis se realizará con el promedio de los resultados.

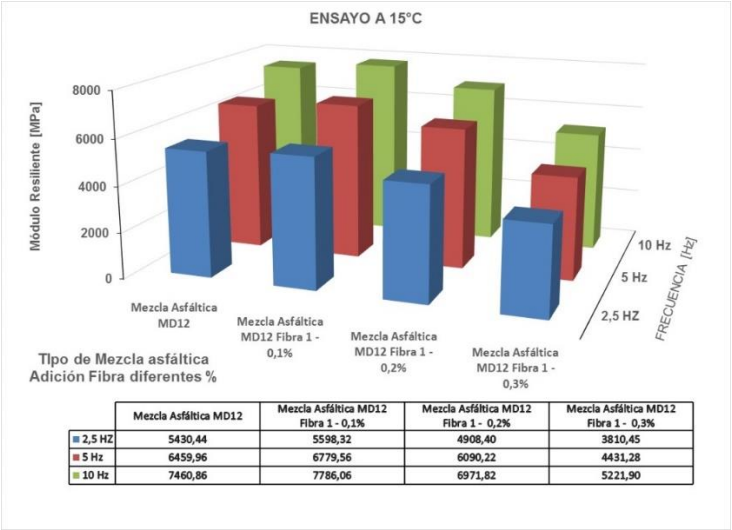
En la figura 147, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.1% de fibra. De otra parte, la dosificación de 0.3%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. En el caso de la dosificación al 0.2%, solo para la frecuencia de 2.5 Hz, aumento el módulo. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	6501,16	7531,60	6736,50	5149,78
5 Hz	8042,68	8963,74	7908,62	5913,78
10 Hz	9250,06	9601,28	8837,96	6580,03

Figura 147. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 10°C

En la figura 148, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 15°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia un incremento del módulo al adicionar 0.1% de fibra. De otra parte, las dosificaciones de 0.2% y 0.3%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.

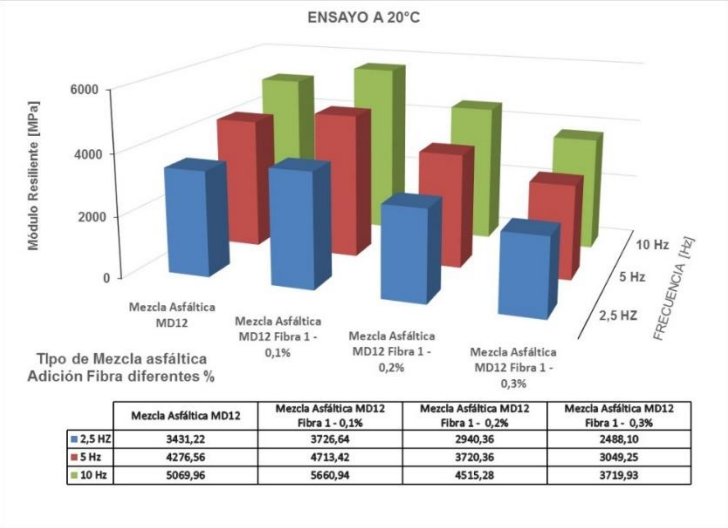


	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	5430,44	5598,32	4908,40	3810,45
5 Hz	6459,96	6779,56	6090,22	4431,28
10 Hz	7460,86	7786,06	6971,82	5221,90

Figura 148. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 15°C

En la figura 149, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 20°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia un incremento del módulo al adicionar 0.1% de fibra. De otra parte, las dosificaciones de 0.2% y 0.3%,

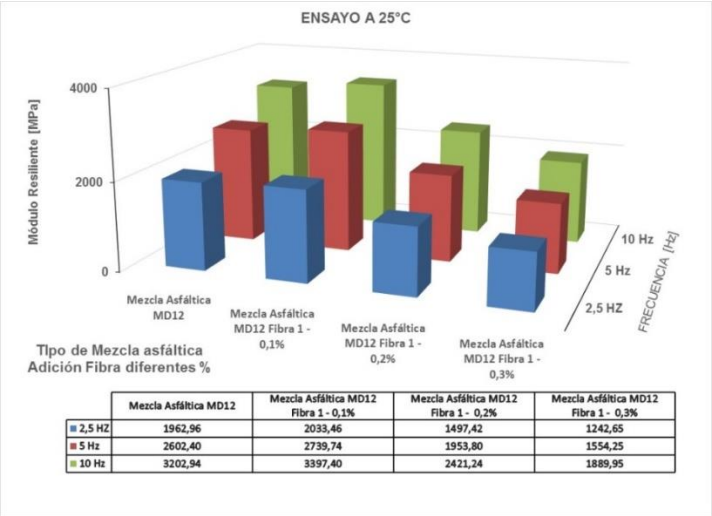
presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	3431,22	3726,64	2940,36	2488,10
5 Hz	4276,56	4713,42	3720,36	3049,25
10 Hz	5069,96	5660,94	4515,28	3719,93

Figura 149. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 20°C

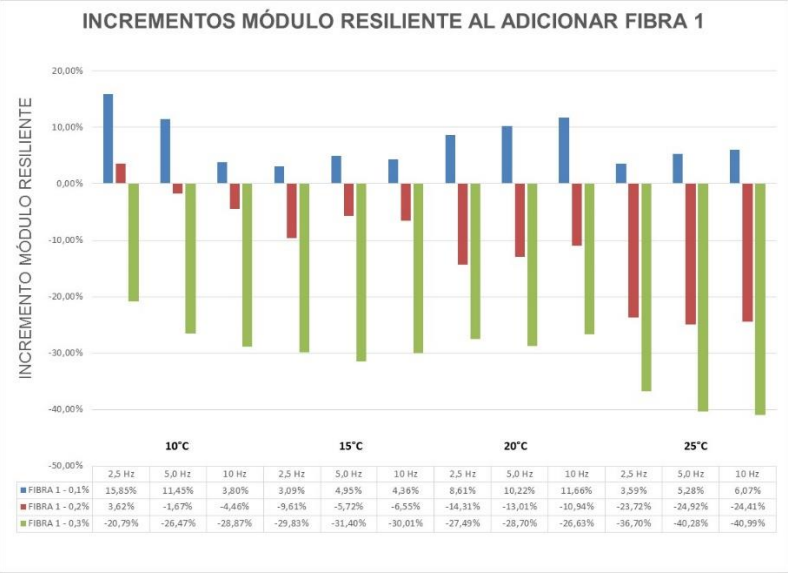
En la figura 150, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia un incremento del módulo al adicionar 0.1% de fibra. De otra parte, las dosificaciones de 0.2% y 0.3%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	1962,96	2033,46	1497,42	1242,65
5 Hz	2602,40	2739,74	1953,80	1554,25
10 Hz	3202,94	3397,40	2421,24	1889,95

Figura 150. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 25°C

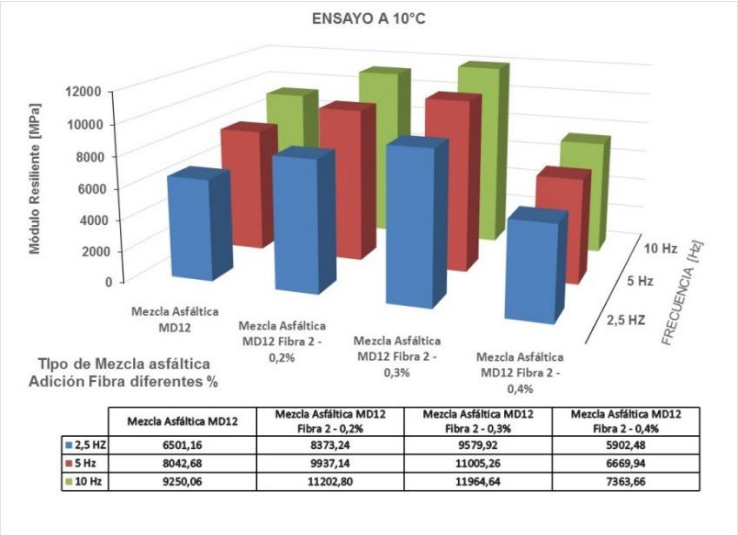
En la figura 151, incrementos del módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que solamente para la adición de 0.1% de fibra, irrelevantemente la temperatura de ensayo, existe incremento en el módulo, los cuales oscilan entre 3% y 15%. El mayor incremento de módulo se obtiene para una temperatura de 10°C y 2.5 Hz. En el caso de las dosificaciones 0.2% y 0.3%, las diminuciones pueden llegar hasta de 41% (25°C, dosificación 0.3% y 10 Hz). De otra parte, se resalta que al adicionar 0.3% de fibra, irrelevantemente la temperatura y frecuencia el módulo presenta las mayores disminuciones en comparación a la muestra patrón. Estos resultados muestran que solamente es viable utilizar fibra 1 al 0.1% para mejorar la respuesta de la mezcla asfáltica ante el módulo resiliente, sin importar la temperatura y frecuencia de ensayo.



	10°C 2,5 Hz	10°C 5,0 Hz	10°C 10 Hz	15°C 2,5 Hz	15°C 5,0 Hz	15°C 10 Hz	20°C 2,5 Hz	20°C 5,0 Hz	20°C 10 Hz	25°C 2,5 Hz	25°C 5,0 Hz	25°C 10 Hz
FIBRA 1 - 0,1%	15,85%	11,45%	3,80%	3,09%	4,95%	4,36%	8,61%	10,22%	11,66%	3,59%	5,28%	6,07%
FIBRA 1 - 0,2%	3,62%	-1,67%	-4,46%	-9,61%	-5,72%	-6,55%	-14,31%	-13,01%	-10,94%	-23,72%	-24,92%	-24,41%
FIBRA 1 - 0,3%	-20,79%	-26,47%	-28,87%	-29,83%	-31,40%	-30,01%	-27,49%	-28,70%	-26,63%	-36,70%	-40,28%	-40,99%

Figura 151. Incremento Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1

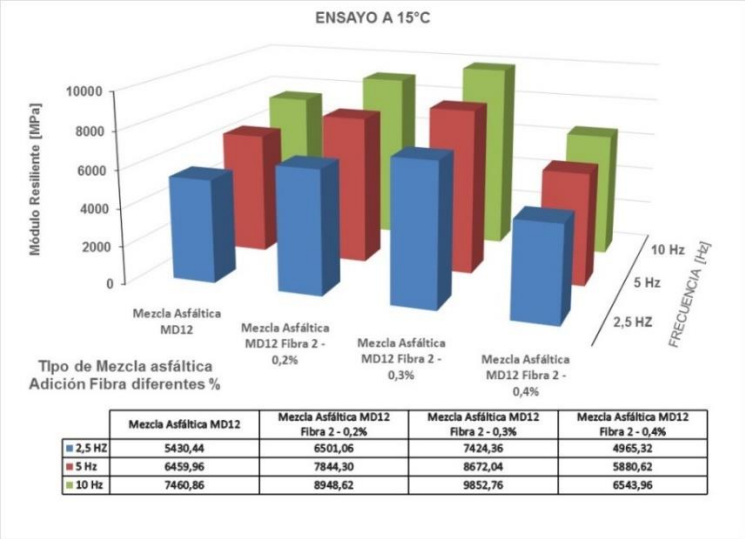
En la figura 152, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.2% y 0.3% de fibra, siendo mayor la dosificación 0.3%. De otra parte, la dosificación de 0.4%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	6501,16	8373,24	9579,92	5902,48
5 Hz	8042,68	9937,14	11005,26	6669,94
10 Hz	9250,06	11202,80	11964,64	7363,66

Figura 152. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 10°C

En la figura 153, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 15°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.2% y 0.3% de fibra, siendo mayor la dosificación 0.3%. De otra parte, la dosificación de 0.4%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.

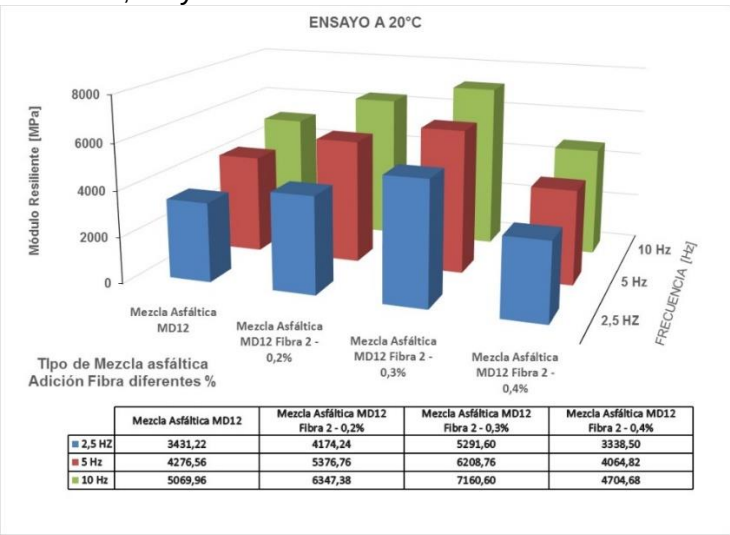


	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	5430,44	6501,06	7424,36	4965,32
5 Hz	6459,96	7844,30	8672,04	5880,62
10 Hz	7460,86	8948,62	9852,76	6543,96

Figura 153. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 15°C

En la figura 154, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 20°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres

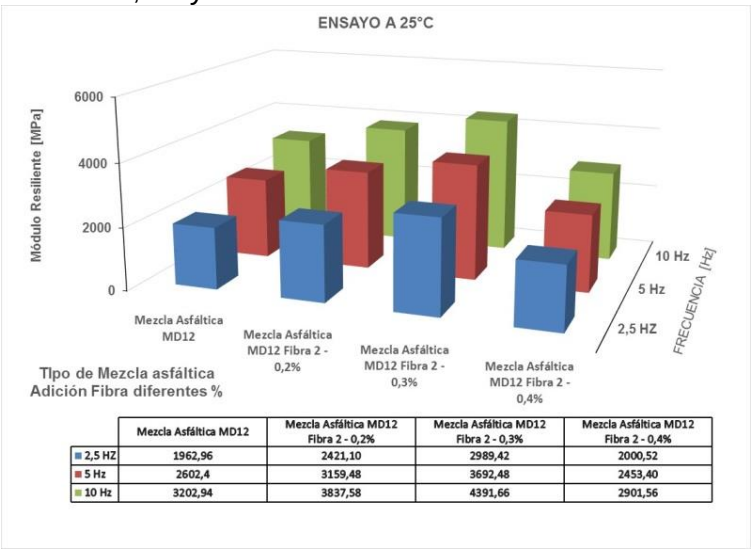
frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.2% y 0.3% de fibra, siendo mayor la dosificación 0.3%. De otra parte, la dosificación de 0.4%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	3431,22	4174,24	5291,60	3338,50
5 Hz	4276,56	5376,76	6208,76	4064,82
10 Hz	5069,96	6347,38	7160,60	4704,68

Figura 154. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 20°C

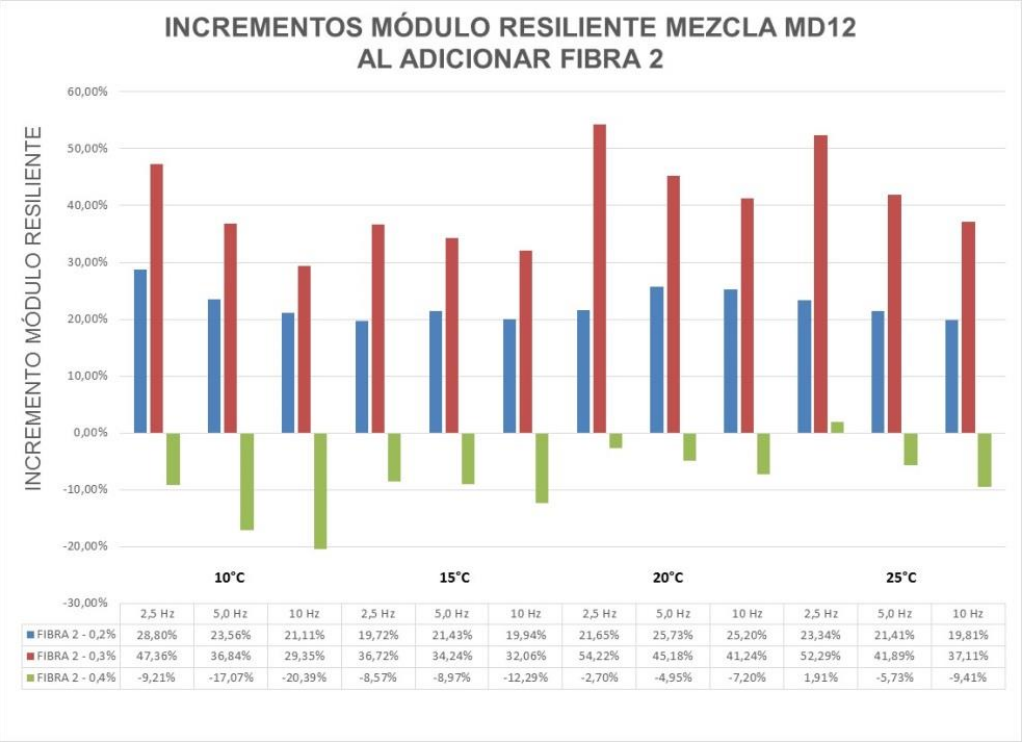
En la figura 155, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.2% y 0.3% de fibra, siendo mayor la dosificación 0.3%. De otra parte, la dosificación de 0.4%, presente disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	1962,96	2421,10	2989,42	2000,52
5 Hz	2602,4	3159,48	3692,48	2453,40
10 Hz	3202,94	3837,58	4391,66	2901,56

Figura 155. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2 y temperatura ejecución ensayo 25°C

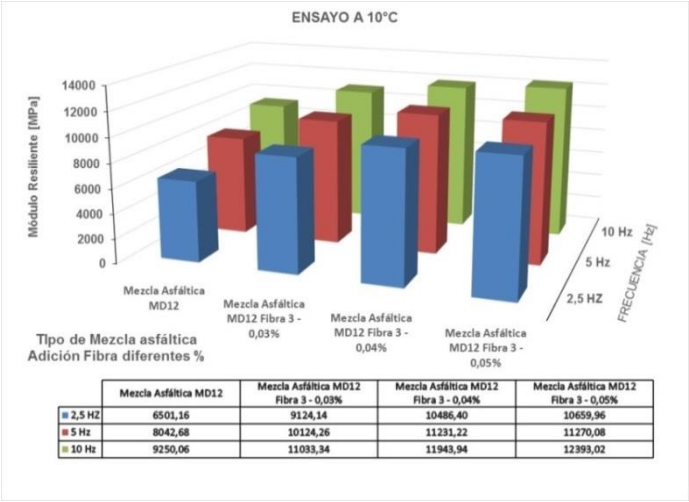
En la figura 156, incrementos del módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que solamente para la adición de 0.2% y 0.3% de fibra, irrelevantemente la temperatura de ensayo, existe incremento en el módulo, los cuales oscilan entre 20% y 54%. El mayor incremento de módulo se obtiene para una temperatura de 20°C, frecuencia 2.5 Hz y dosificación 0.3%. En el caso de la dosificación 0.4%, las diminuciones pueden llegar hasta 20% (10°C y 10 Hz). De otra parte, se resalta que al adicionar 0.3% de fibra, irrelevantemente la temperatura y frecuencia, el módulo presenta las mayores disminuciones en comparación a la muestra patrón. Finalmente, la incidencia positiva de las fibras se evidencia más incrementada a las temperaturas de 20°C y 25°C.



	10°C 2,5 Hz	10°C 5,0 Hz	10°C 10 Hz	15°C 2,5 Hz	15°C 5,0 Hz	15°C 10 Hz	20°C 2,5 Hz	20°C 5,0 Hz	20°C 10 Hz	25°C 2,5 Hz	25°C 5,0 Hz	25°C 10 Hz
FIBRA 2 - 0,2%	28,80%	23,56%	21,11%	19,72%	21,43%	19,94%	21,65%	25,73%	25,20%	23,34%	21,41%	19,81%
FIBRA 2 - 0,3%	47,36%	36,84%	29,35%	36,72%	34,24%	32,06%	54,22%	45,18%	41,24%	52,29%	41,89%	37,11%
FIBRA 2 - 0,4%	-9,21%	-17,07%	-20,39%	-8,57%	-8,97%	-12,29%	-2,70%	-4,95%	-7,20%	1,91%	-5,73%	-9,41%

Figura 156. Incremento Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 2

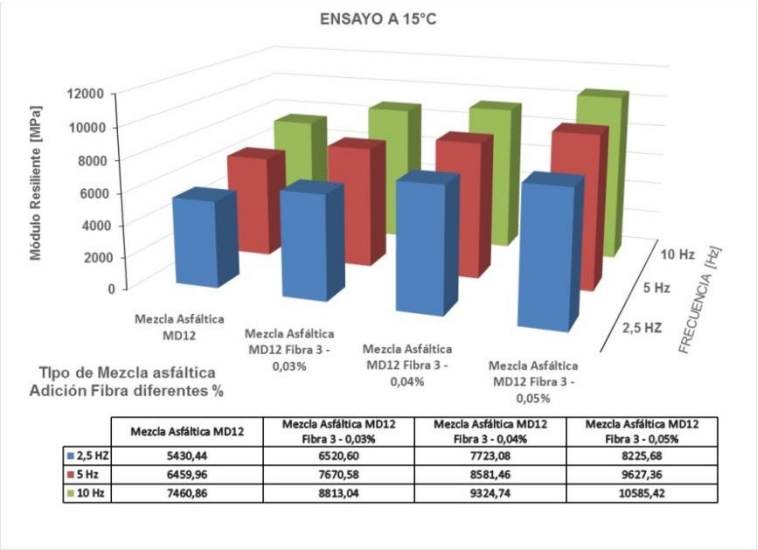
En la figura 157, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que las tres dosificaciones incrementan los módulos resilientes entre 19% y 63%. Así mismo, los mayores incrementos se obtienen para la dosificación 0.05%.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	6501,16	9124,14	10486,40	10659,96
5 Hz	8042,68	10124,26	11231,22	11270,08
10 Hz	9250,06	11033,34	11943,94	12393,02

Figura 157. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 10°C

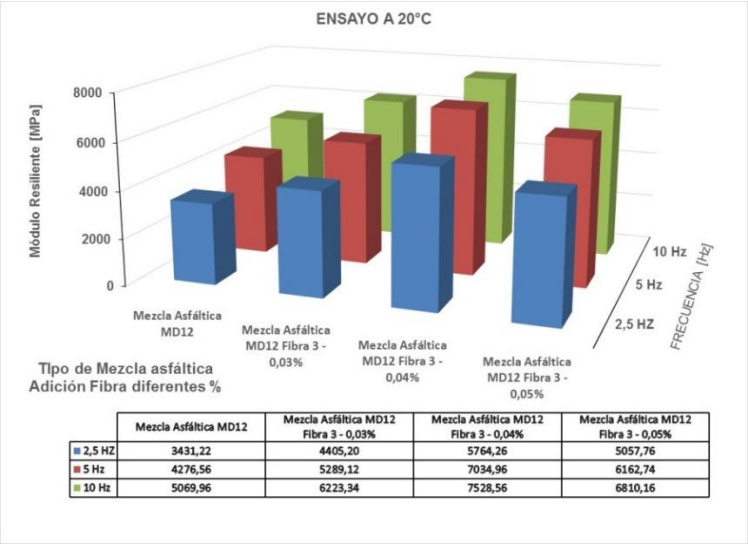
En la figura 158, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 15°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que las tres dosificaciones incrementan los módulos resilientes entre 18% y 51%. Así mismo, los mayores incrementos se obtienen para la dosificación 0.05%.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	5430,44	6520,60	7723,08	8225,68
5 Hz	6459,96	7670,58	8581,46	9627,36
10 Hz	7460,86	8813,04	9324,74	10585,42

Figura 158. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 15°C

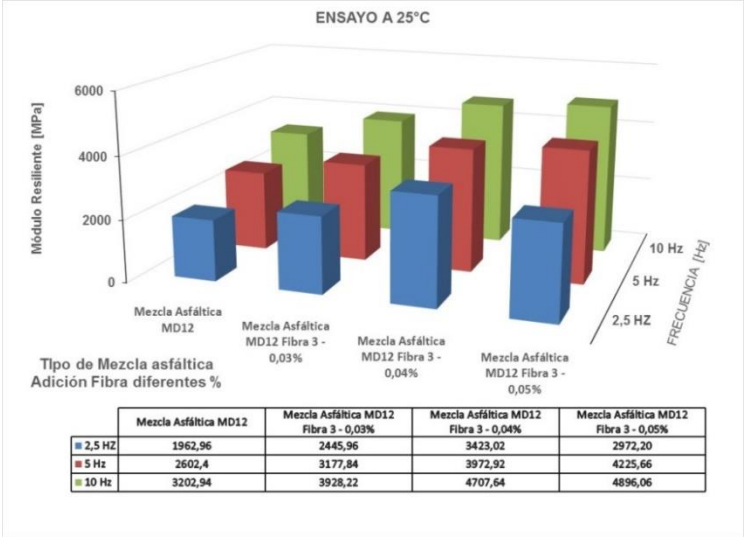
En la figura 159, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 20°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que las tres dosificaciones incrementan los módulos resilientes entre 22% y 64%. Así mismo, los mayores incrementos se obtienen para la dosificación 0.04%.



	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	3431,22	4405,20	5764,26	5057,76
5 Hz	4276,56	5289,12	7034,96	6162,74
10 Hz	5069,96	6223,34	7528,56	6810,16

Figura 159. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3 y temperatura ejecución ensayo 20°C

En la figura 160, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que las tres dosificaciones incrementan los módulos resilientes entre 22% y 74%. Así mismo, los mayores incrementos se obtienen para las dosificaciones 0.04 % y 0.05%.

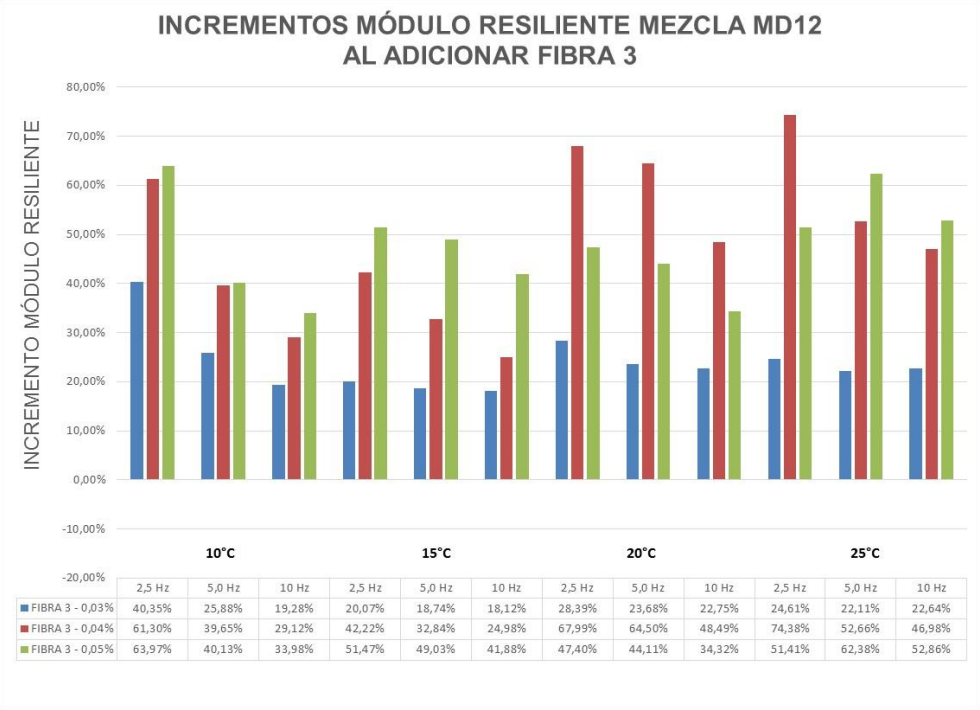


	Mezcla Asfáltica MD12	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MD12 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	1962,96	2445,96	3423,02	2972,20
5 Hz	2602,4	3177,84	3972,92	4225,66
10 Hz	3202,94	3928,22	4707,64	4896,06

Figura 160. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 1 y temperatura ejecución ensayo 25°C

En la figura 161, incrementos del módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que irrelevantemente la temperatura de ensayo, dosificación y frecuencia, existen incrementos en el módulo, los cuales oscilan entre 18% y 74%. El mayor incremento de módulo se obtiene para una temperatura de 25°C, frecuencia 2.5 Hz y dosificación 0.05%. De otra parte, la dosificación 0.03% presenta incrementos similares sin importar la temperatura y

frecuencia de ensayo, mientras que las dosificaciones 0.04% y 0.05%, estos son mayores a 20°C y 25°C.



	10°C 2,5 Hz	10°C 5,0 Hz	10°C 10 Hz	15°C 2,5 Hz	15°C 5,0 Hz	15°C 10 Hz	20°C 2,5 Hz	20°C 5,0 Hz	20°C 10 Hz	25°C 2,5 Hz	25°C 5,0 Hz	25°C 10 Hz
FIBRA 3 - 0,03%	40,35%	25,88%	19,28%	20,07%	18,74%	18,12%	28,39%	23,68%	22,75%	24,61%	22,11%	22,64%
FIBRA 3 - 0,04%	61,30%	39,65%	29,12%	42,22%	32,84%	24,98%	67,99%	64,50%	48,49%	74,38%	52,66%	46,98%
FIBRA 3 - 0,05%	63,97%	40,13%	33,98%	51,47%	49,03%	41,88%	47,40%	44,11%	34,32%	51,41%	62,38%	52,86%

Figura 161. Incremento Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MD12, adición fibra 3

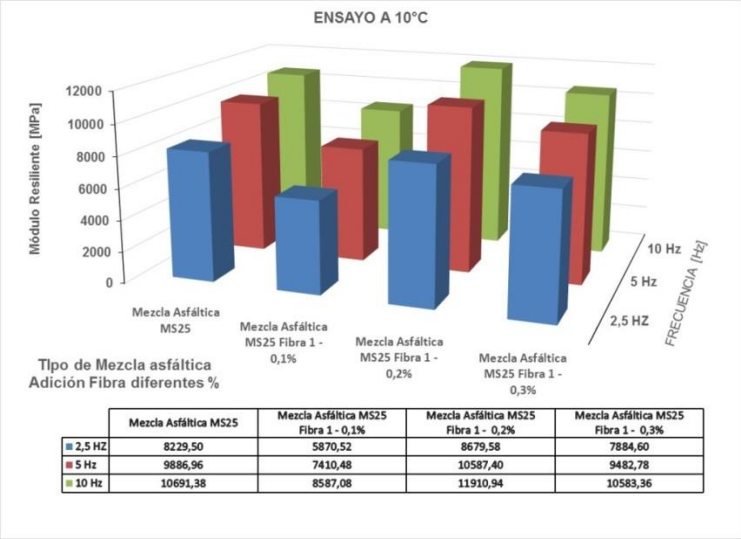
Finalmente, al evaluar las diferentes fibras y dosificaciones de la respuesta del módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MD12, se puede evidenciar que sin importar la temperatura y frecuencia de ensayo, la fibra 3 presenta los mayores incrementos. En el caso de la fibra 2, la dosificación favorable es 0.2% y 0.3%, sin importar la temperatura y frecuencia de ensayo. Por último, la fibra 1, solamente la dosificación 0.1% presenta un comportamiento favorable.

7.8.6 Módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras

El comportamiento del módulo resiliente de las mezclas asfálticas con granulometría MS25, modificadas con fibras 1,2 y 3, dosificadas a diferentes porcentajes y ensayadas a diferentes frecuencias (2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz) y diferentes temperaturas (10°C, 15°C, 20°C y 25°C), se analizarán a continuación. Se Resalta que se ejecutaron cinco ensayos por tipo de fibra, dosificación, frecuencia y temperatura y que el análisis se realizará con el promedio de los resultados.

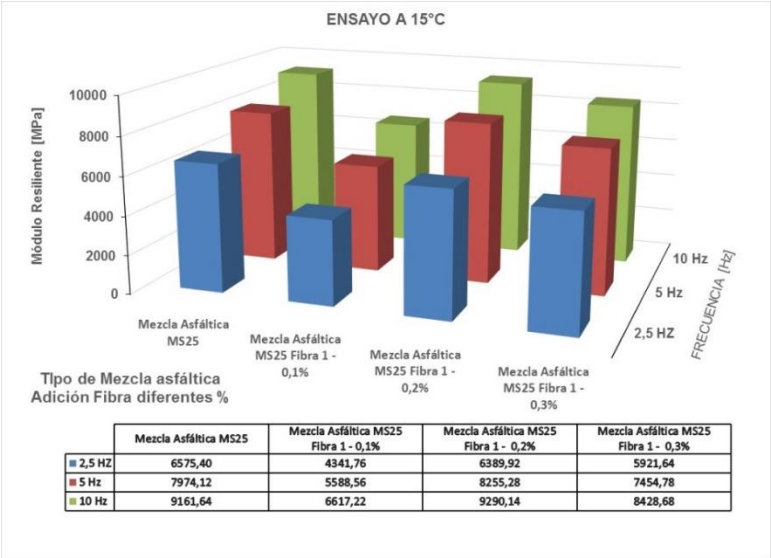
En las figuras 162,163, 164 y 165, módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz), existe un incremento del módulo al adicionar 0.2% de fibra. De otra parte, la dosificación de 0.1% y 0.3%,

presentan disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente.



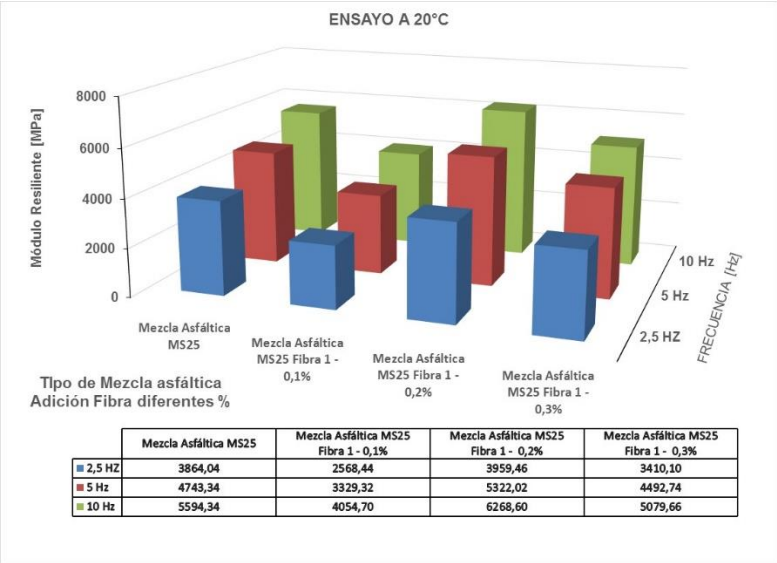
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	8229,50	5870,52	8679,58	7884,60
5 Hz	9886,96	7410,48	10587,40	9482,78
10 Hz	10691,38	8587,08	11910,94	10583,36

Figura 162. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 10°C



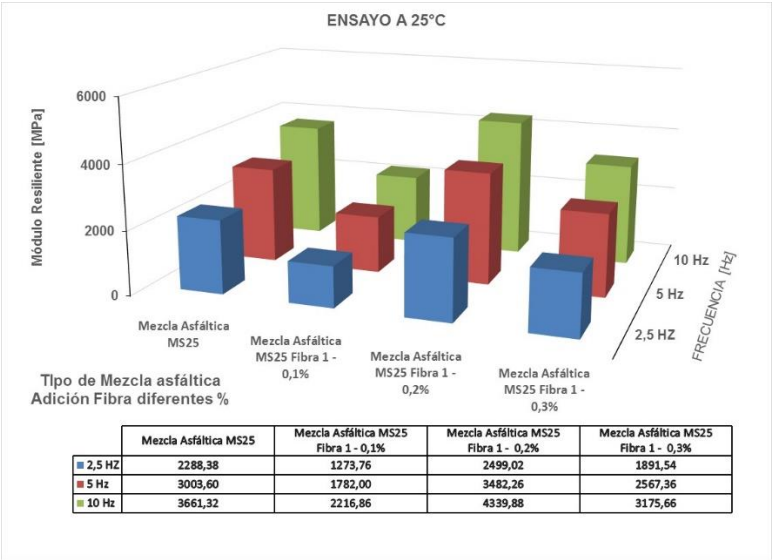
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	6575,40	4341,76	6389,92	5921,64
5 Hz	7974,12	5588,56	8255,28	7454,78
10 Hz	9161,64	6617,22	9290,14	8428,68

Figura 163. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 15°C



	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	3864,04	2568,44	3959,46	3410,10
5 Hz	4743,34	3329,32	5322,02	4492,74
10 Hz	5594,34	4054,70	6268,60	5079,66

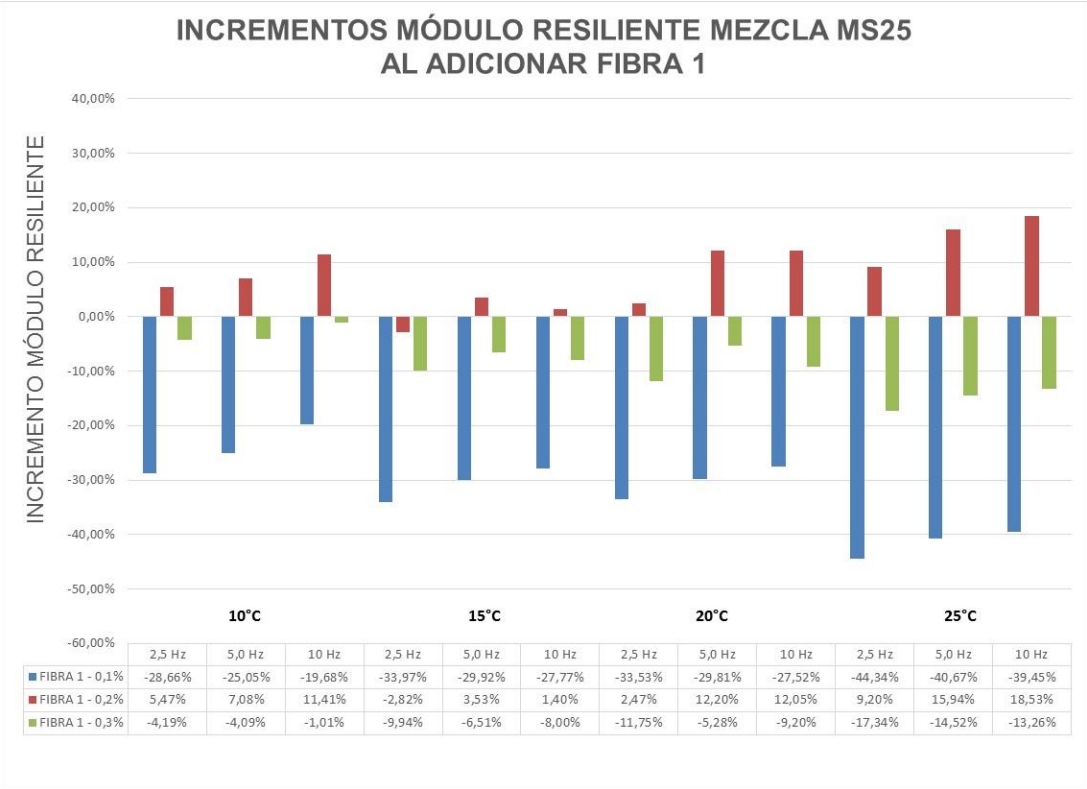
Figura 164. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 20°C



	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,1%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 1 - 0,3%
2,5 HZ	2288,38	1273,76	2499,02	1891,54
5 Hz	3003,60	1782,00	3482,26	2567,36
10 Hz	3661,32	2216,86	4339,88	3175,66

Figura 165. Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1 y ejecución ensayo 25°C

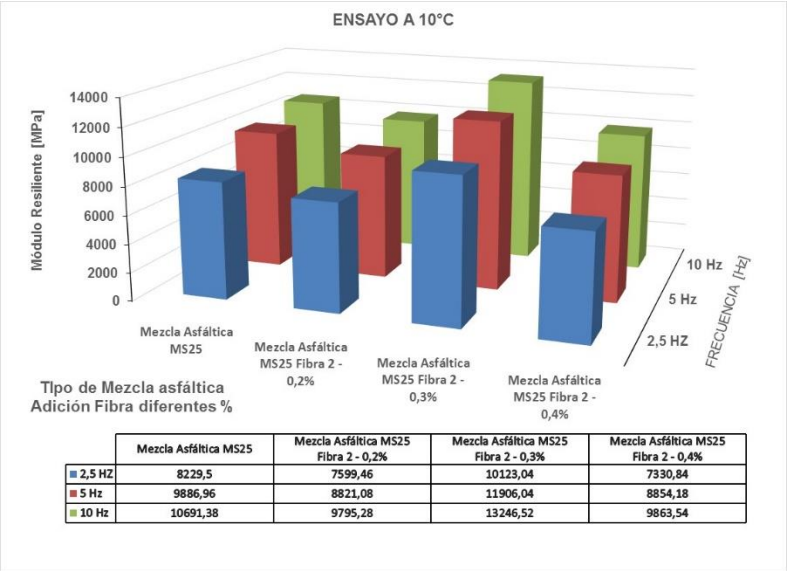
En la figura 166, incrementos del módulo resiliente promedio de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1, temperatura de ensayo 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que las dosificaciones de 0.1 % y 0.3%, irrelevantemente la frecuencia o temperatura de ensayo, existe un descenso en el módulo, siendo mayor para 0.1%. De otra parte, la dosificación 0.2%, presente incrementos en el módulo y especialmente a las temperaturas de 20°C y 25°C.



	10°C 2,5 Hz	10°C 5,0 Hz	10°C 10 Hz	15°C 2,5 Hz	15°C 5,0 Hz	15°C 10 Hz	20°C 2,5 Hz	20°C 5,0 Hz	20°C 10 Hz	25°C 2,5 Hz	25°C 5,0 Hz	25°C 10 Hz
FIBRA 1 - 0,1%	-28,66%	-25,05%	-19,68%	-33,97%	-29,92%	-27,77%	-33,53%	-29,81%	-27,52%	-44,34%	-40,67%	-39,45%
FIBRA 1 - 0,2%	5,47%	7,08%	11,41%	-2,82%	3,53%	1,40%	2,47%	12,20%	12,05%	9,20%	15,94%	18,53%
FIBRA 1 - 0,3%	-4,19%	-4,09%	-1,01%	-9,94%	-6,51%	-8,00%	-11,75%	-5,28%	-9,20%	-17,34%	-14,52%	-13,26%

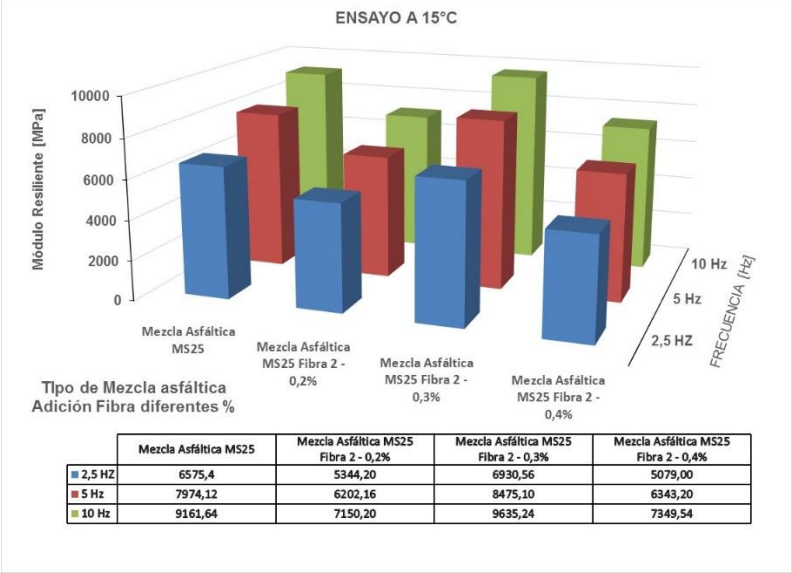
Figura 166. Incrementos Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 1

En las figuras 167, 168, 169 y 170, módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz) y cuatro temperaturas de ensayo (10°C, 15°C, 20°C y 25°C), existe un incremento del módulo al adicionar 0.3% de fibra y además, el mayor valor se obtienen para la temperatura de 10°C, sin importar la frecuencia de ensayo. De otra parte, la dosificación de 0.2% y 0.4%, presentan disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia. Respecto a la incidencia de la temperatura del ensayo en la disminución de los módulos, esta es mayor a las temperaturas que están entre 15°c y 25°C. Finalmente, la incidencia de las dosificaciones 0.2% y 0.4% es muy similar, mostrándose que la temperatura y frecuencia del ensayo no inciden en la respuesta de la mezcla.



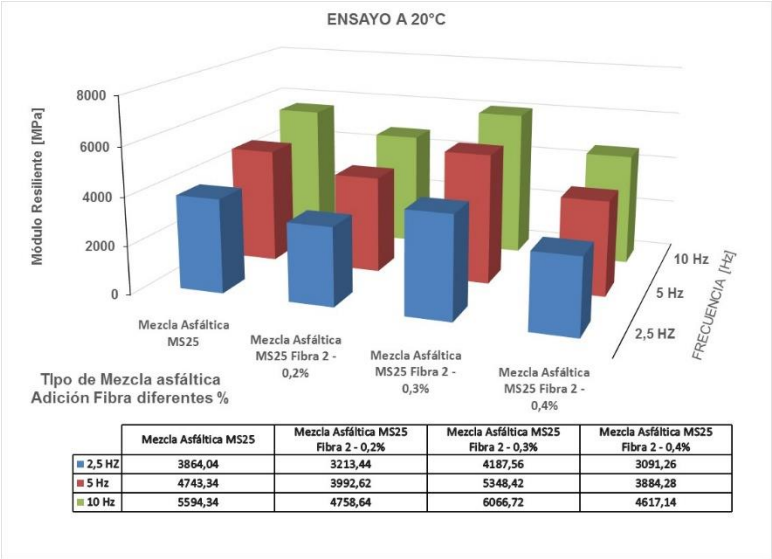
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	8229,5	7599,46	10123,04	7330,84
5 Hz	9886,96	8821,08	11906,04	8854,18
10 Hz	10691,38	9795,28	13246,52	9863,54

Figura 167. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 10°C



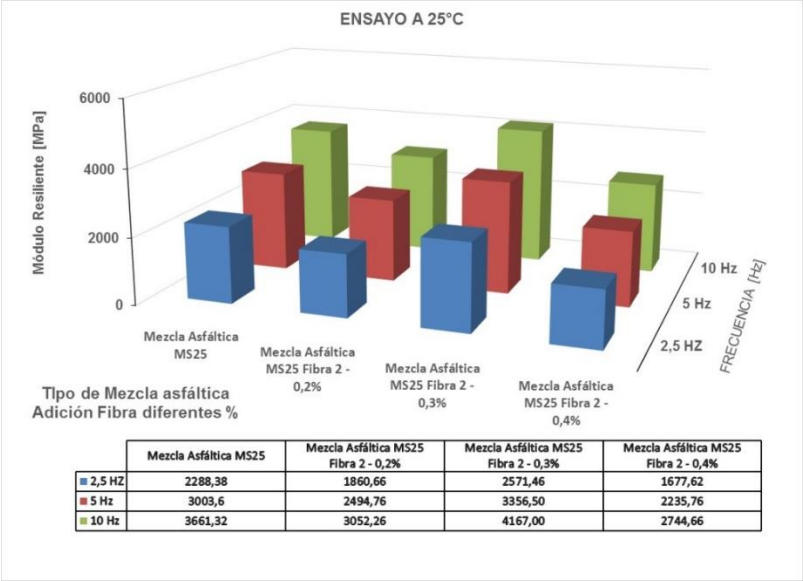
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	6575,4	5344,20	6930,56	5079,00
5 Hz	7974,12	6202,16	8475,10	6343,20
10 Hz	9161,64	7150,20	9635,24	7349,54

Figura 168. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 15°C



	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	3864,04	3213,44	4187,56	3091,26
5 Hz	4743,34	3992,62	5348,42	3884,28
10 Hz	5594,34	4758,64	6066,72	4617,14

Figura 169. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 20°C

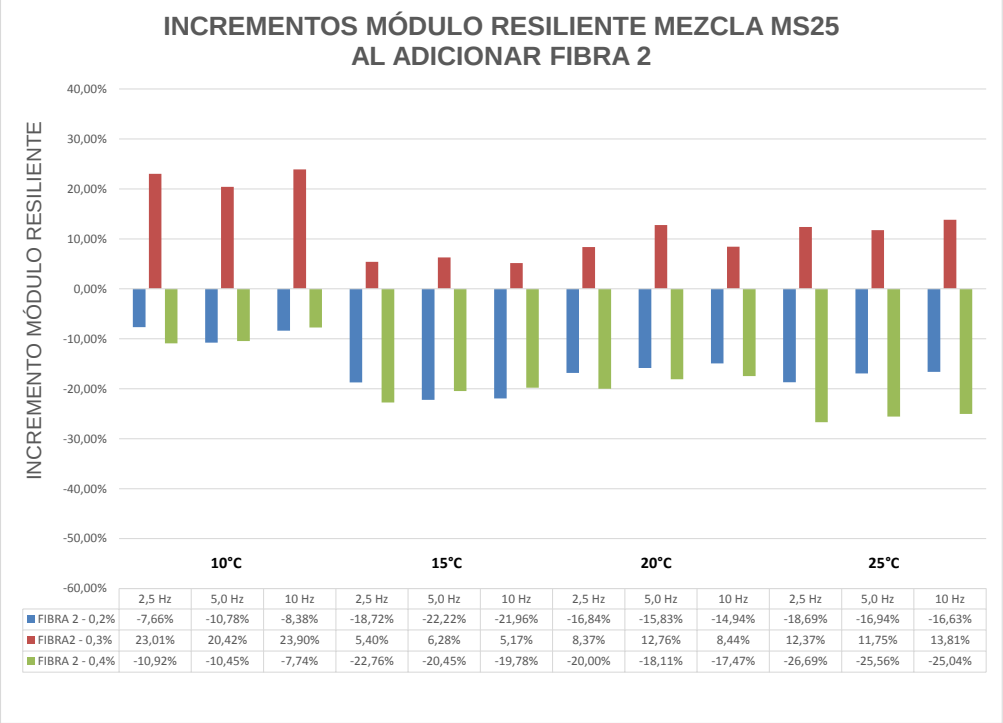


	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,2%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,3%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 2 - 0,4%
2,5 HZ	2288,38	1860,66	2571,46	1677,62
5 Hz	3003,6	2494,76	3356,50	2235,76
10 Hz	3661,32	3052,26	4167,00	2744,66

Figura 170. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2 y ejecución ensayo 25°C

En la figura 171, incrementos del módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 2, temperatura de ensayo 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, existe un descenso en el módulo, el cual oscila entre 8% y 27%, siendo mayor a 20°C, 2.5 HZ y 0.4%. Así mismo, se observa que los descensos son mayores a la temperatura de 25°C. De otra parte, los incrementos del módulo oscilan entre 5% y 23%, siendo mayores a 10°C, sin importar la frecuencia utilizada. Para los 15°C de ensayo, los módulos se incrementan levemente entre 5% y 6%. Finalmente, los incrementos para las temperaturas de 20°C y 25°C son

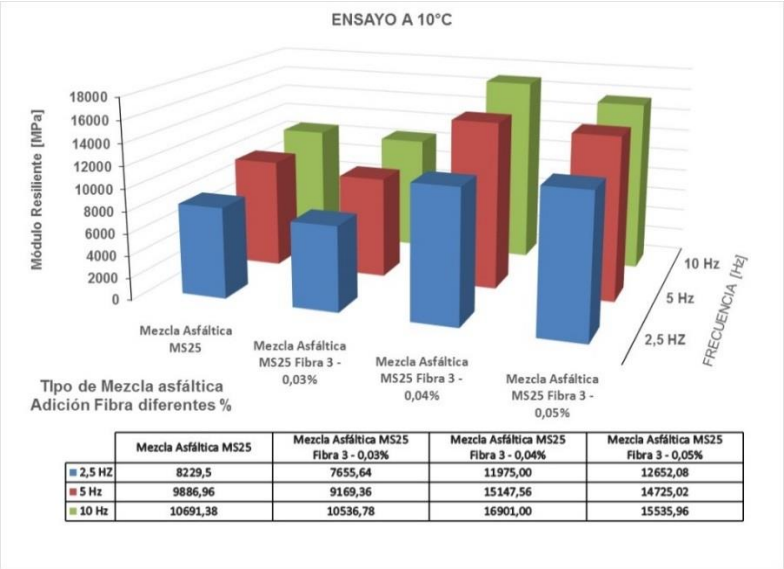
aproximadamente 10%, sin importar la frecuencia del ensayo. Estos resultados muestran que la fibra 2, solo es favorable para la dosificación 0.3% y especialmente a la temperatura de 10°C.



	10°C			15°C			20°C			25°C		
	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz
FIBRA 2 - 0,2%	-7,66%	-10,78%	-8,38%	-18,72%	-22,22%	-21,96%	-16,84%	-15,83%	-14,94%	-18,69%	-16,94%	-16,63%
FIBRA2 - 0,3%	23,01%	20,42%	23,90%	5,40%	6,28%	5,17%	8,37%	12,76%	8,44%	12,37%	11,75%	13,81%
FIBRA 2 - 0,4%	-10,92%	-10,45%	-7,74%	-22,76%	-20,45%	-19,78%	-20,00%	-18,11%	-17,47%	-26,69%	-25,56%	-25,04%

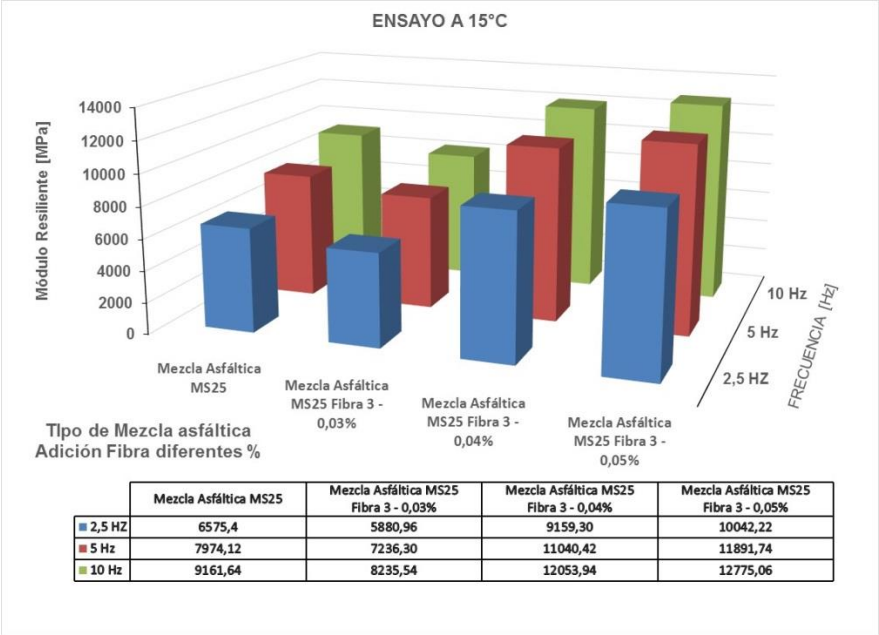
Figura 171. Incrementos Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 2

En las figuras 172, 173, 174 y 175, módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, temperatura de ensayo de 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que para las tres frecuencias (2.5 – 5.0 - 10 Hz) y cuatro temperaturas de ensayo (10°C, 15°C, 20°C y 25°C), existe un incremento del módulo al adicionar 0.04% y 0.05% de fibra. De otra parte, la dosificación de 0.03%, presentan disminuciones del módulo, irrelevantemente la frecuencia utilizada. La tendencia del módulo para todas las probetas ensayadas, irrelevantemente la dosificación utilizada, es que a mayor frecuencia, mayor módulo resiliente. Así mismo, se observa que para las temperaturas altas el incremento del módulo es mayor.



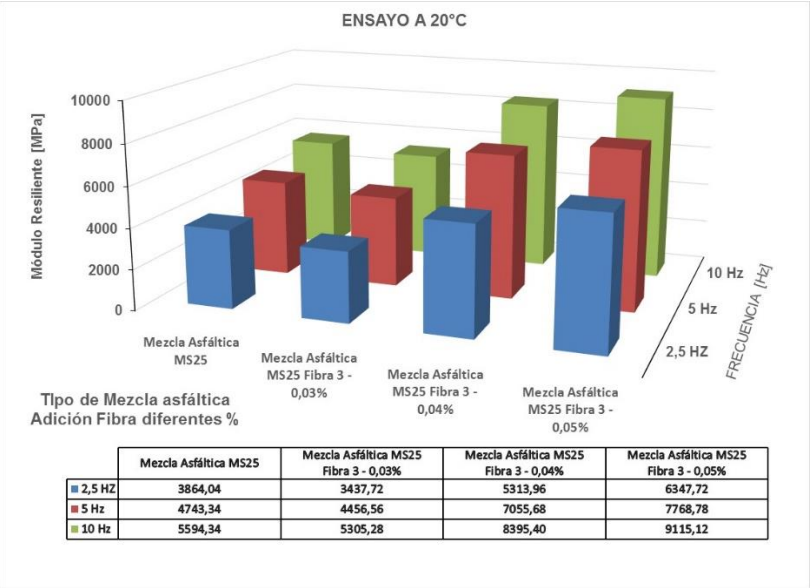
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	8229,5	7655,64	11975,00	12652,08
5 Hz	9886,96	9169,36	15147,56	14725,02
10 Hz	10691,38	10536,78	16901,00	15535,96

Figura 172. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 10°C



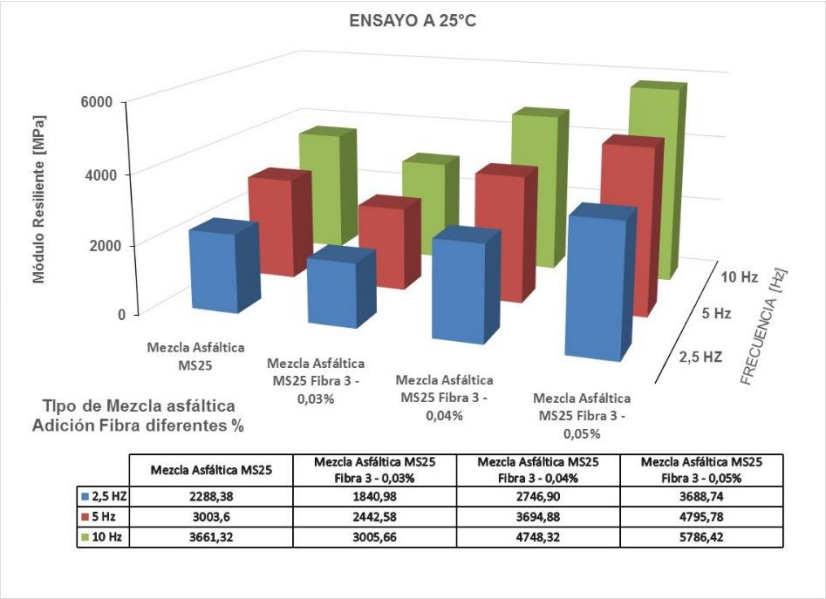
	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	6575,4	5880,96	9159,30	10042,22
5 Hz	7974,12	7236,30	11040,42	11891,74
10 Hz	9161,64	8235,54	12053,94	12775,06

Figura 173. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 15°C



	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	3864,04	3437,72	5313,96	6347,72
5 Hz	4743,34	4456,56	7055,68	7768,78
10 Hz	5594,34	5305,28	8395,40	9115,12

Figura 174. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 20°C

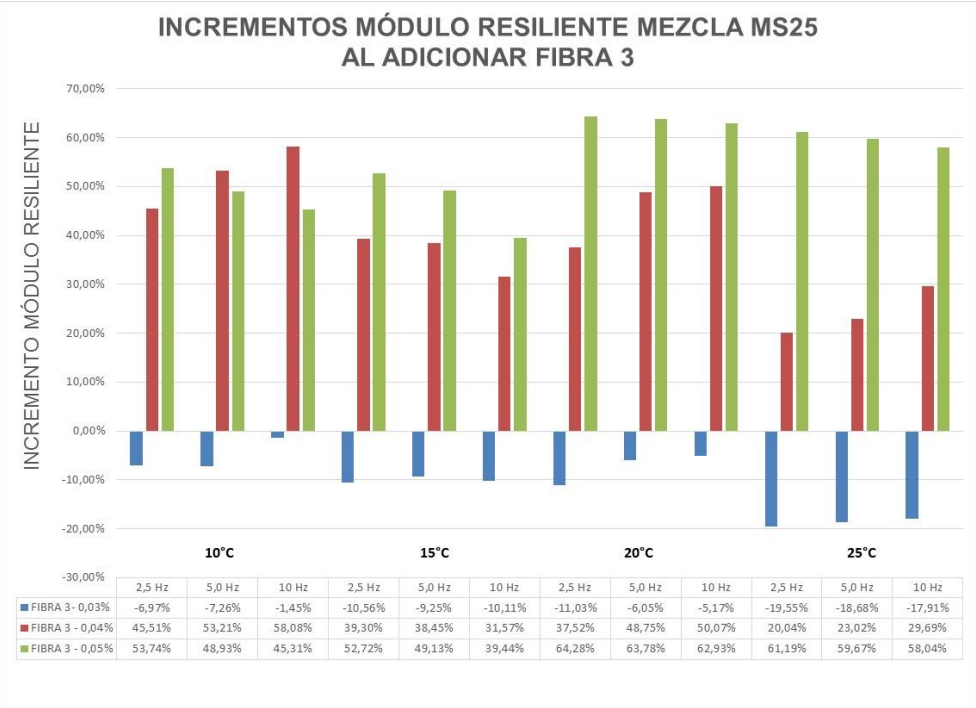


	Mezcla Asfáltica MS25	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,03%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,04%	Mezcla Asfáltica MS25 Fibra 3 - 0,05%
2,5 HZ	2288,38	1840,98	2746,90	3688,74
5 Hz	3003,6	2442,58	3694,88	4795,78
10 Hz	3661,32	3005,66	4748,32	5786,42

Figura 175. Módulo resiliente mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3 y ejecución ensayo 25°C

En la figura 176, incrementos del módulo resiliente de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 3, temperatura de ensayo 10°C, 15°C, 20°C y 25°C y frecuencias de ensayo a 2.5 Hz, 5.0 Hz y 10 Hz, se evidencia que existe un incremento del módulo, irrelevantemente la temperatura y frecuencia del ensayo para las dosificaciones de 0.04% y 0.05%. Además, dichos incrementos oscilan entre 20 y 58% para la dosificación 0.04% y entre 40 y 64% para la adición de fibra al 0.05%, mostrando

más favorabilidad para la último porcentaje. Así mismo, se observa que a temperaturas de 20 y 25°C, el módulo tiene mayor incremento para la dosificación 0.05% y a temperaturas de 10 y 20°C para la dosificación 0.04%. Referente a la disminución del módulo para el porcentaje del 0.03%, este es mayor a la temperatura de 25°C y menor a 10°C.



	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz	2,5 Hz	5,0 Hz	10 Hz
FIBRA 3- 0,03%	-6,97%	-7,26%	-1,45%	-10,56%	-9,25%	-10,11%	-11,03%	-6,05%	-5,17%	-19,55%	-18,68%	-17,91%
FIBRA 3 - 0,04%	45,51%	53,21%	58,08%	39,30%	38,45%	31,57%	37,52%	48,75%	50,07%	20,04%	23,02%	29,69%
FIBRA 3 - 0,05%	53,74%	48,93%	45,31%	52,72%	49,13%	39,44%	64,28%	63,78%	62,93%	61,19%	59,67%	58,04%

Figura 176. Incrementos Módulo resiliente promedio mezcla asfáltica caliente con granulometría MS25, adición fibra 3

Finalmente, se puede establecer que las fibras que mayor favorecen la respuesta del módulo resiliente en mezclas asfálticas MS25, son las tipo 3, especialmente las dosificaciones 0.04% y 0.05% y que las fibras 2 a 0.2% y 0.4%, desfavorecen especialmente a las temperaturas de ensayo de 20 y 25°C.

7.8.7 Leyes de fatiga mezclas asfálticas con granulometría MD12 con y sin adición de fibras

El comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras tipo 1, 2 y 3 y a diferentes dosificaciones, se evaluarán mediante ensayos de deformación controlada a probetas trapezoidales apoyadas en dos puntos y temperatura de15°C. A continuación se analizarán la pendiente y la deformación al millón de ciclos de las mezclas estudiadas.

En la Figura 177, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, se puede observar que referente a la deformación al millón de ciclos (□6), la muestra con 0.2% de adición de fibra, presenta mayor deformación y menor pendiente con respecto a la muestra patrón, haciéndola más resistente a la fatiga. De otra parte, las otras dos dosificaciones tienen pendientes

levemente mayores y niveles de deformación al millón de ciclos muy similares a la muestra patrón, evidenciando un descenso en la respuesta de las mezclas ante los ciclos de carga.

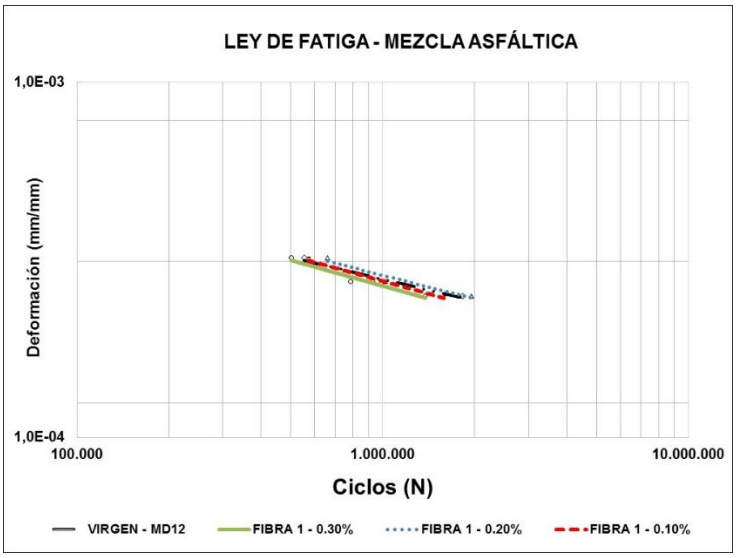


Figura 177. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 1.

En la figura 178, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, se evidencia que la dosificación 0.2%, incremento la deformación al millón de ciclos y disminuyo su pendiente, haciéndola más flexible en relación a la muestra patrón. Es importante resaltar que para las tres dosificaciones existe un descenso en la pendiente, mas no en la deformación al millón de ciclos. Este comportamiento es favorable para mezclas cuyos niveles de ciclos de carga serán elevados.

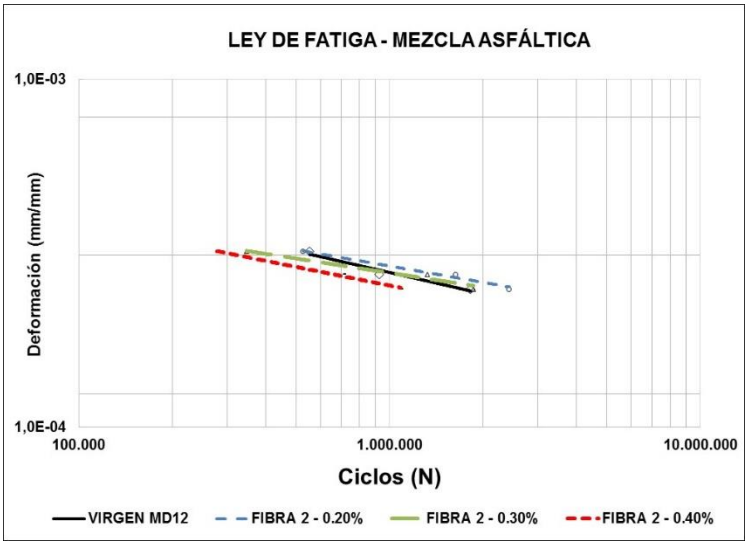


Figura 178. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 2.

En la figura 179, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, se evidencia que sin importar la dosificación,

la deformación al millón de ciclos aumenta y la pendiente disminuye, mostrando que la fibra 3 mejora el comportamiento a fatiga de la mezcla, irrelevantemente el porcentaje utilizado. Sin embargo, el mejor comportamiento referente a la deformación al millón de ciclos esta para la dosificación 0.03% y para la pendiente al 0.05%. Es importante resaltar que a ciclos muy elevados, la pendiente incide más en el comportamiento de la mezcla.

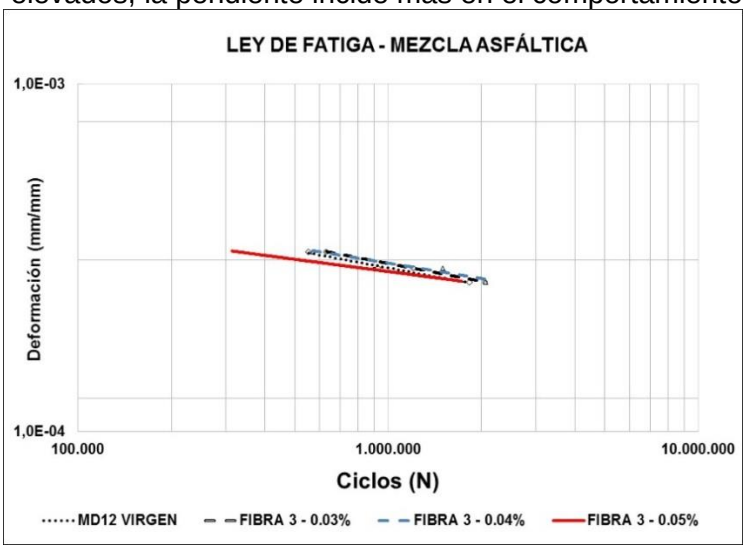
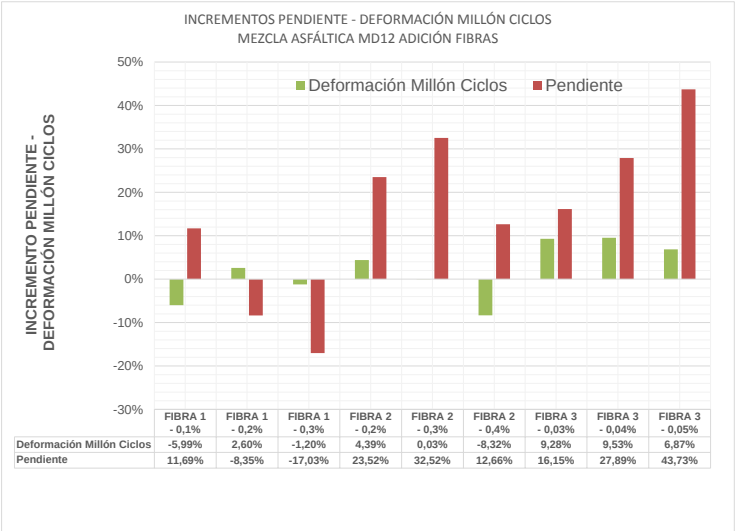


Figura 179. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 3.

En la figura 180, incrementos de la deformación al millón de ciclos y pendiente de las mezclas asfálticas con granulometría MD12, con y sin adición de fibras 1,2 y 3 con diferentes porcentajes, se puede evidenciar que las fibras 2 y 3, presentan incremento de la pendiente y sus magnitudes oscilan entre 12% y 43%, siendo más favorable para la fibra 3 y la dosificación 0.05%. Referente a la deformación al millón de ciclos, la fibra 3, indiferentemente la dosificación, su evidencia un aumento en la deformación. En el caso de la fibras 1, el incremento de la pendiente solo se da para 0.1% y respecto a la deformación, para el 0.2%



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,4%	FIBRA 3 - 0,03%	FIBRA 3 - 0,04%	FIBRA 3 - 0,05%
Deformación Millón Ciclos	-5,99%	2,60%	-1,20%	4,39%	0,03%	-8,32%	9,28%	9,53%	6,87%
Pendiente	11,69%	-8,35%	-17,03%	23,52%	32,52%	12,66%	16,15%	27,89%	43,73%

Figura 180. Incrementos deformación millón de ciclos y pendiente leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MD12 y adición fibra 1, 2 y 3 a diferentes dosificaciones.

7.8.8 Leyes de fatiga mezclas asfálticas con granulometría MS25 con y sin adición de fibras

El comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras tipo 1, 2 y 3 con diferentes dosificaciones, se evaluarán mediante ensayos de deformación controlada a probetas trapezoidales apoyadas en dos puntos y temperatura de15°C. A continuación se analizarán la pendiente y la deformación al millón de ciclos de las mezclas estudiadas.

En la figura 181, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1 a diferentes porcentajes, se puede observar que referente a la deformación al millón de ciclos ($\varepsilon 6$) todas las dosificaciones disminuyen su valor, desfavoreciendo el comportamiento a fatiga de la mezcla al adicionarle fibras tipo 1. Respecto a la pendiente, estas son muy similares o levemente superiores, produciendo el mismo efecto que en la deformación al millón de ciclos. Por ende, la adición de fibras 1, irrelevantemente su dosificación, afecta negativamente el comportamiento a fatiga de la mezcla MS25.

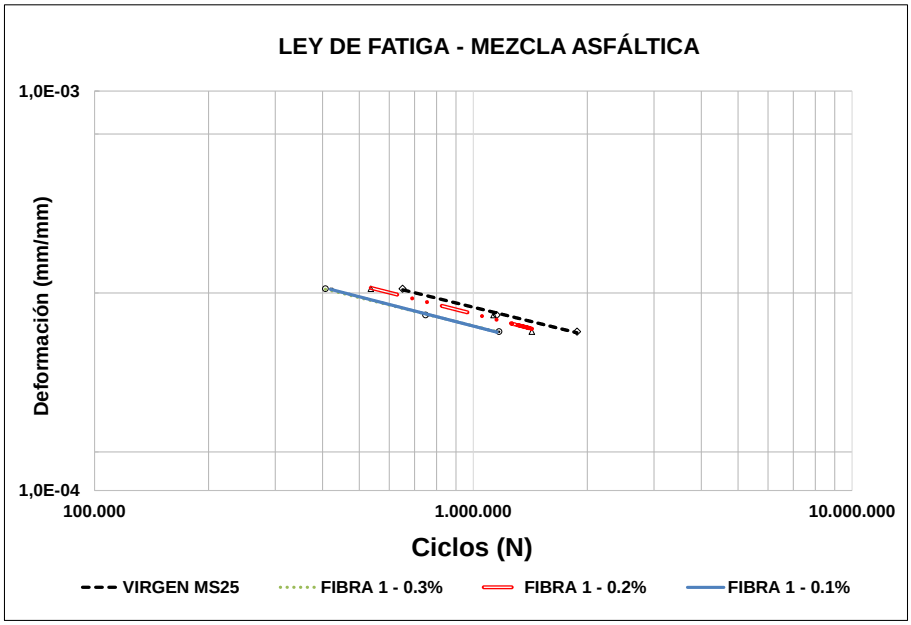


Figura 181. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 1.

En la figura 182, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 2 a diferentes porcentajes, se puede observar que referente a la deformación al millón de ciclos ($\varepsilon 6$) todas las dosificaciones inciden negativamente en el comportamiento a fatiga de la mezcla. De otra parte, la pendiente a la dosificación del 0.4% se aumenta, mientras para las dosificaciones de 0.2% y 0.3%, se disminuye levemente. En general, las fibras 2, desfavorecen el comportamiento a fatiga de la mezcla MD25, especialmente la dosificación al 0.4%.

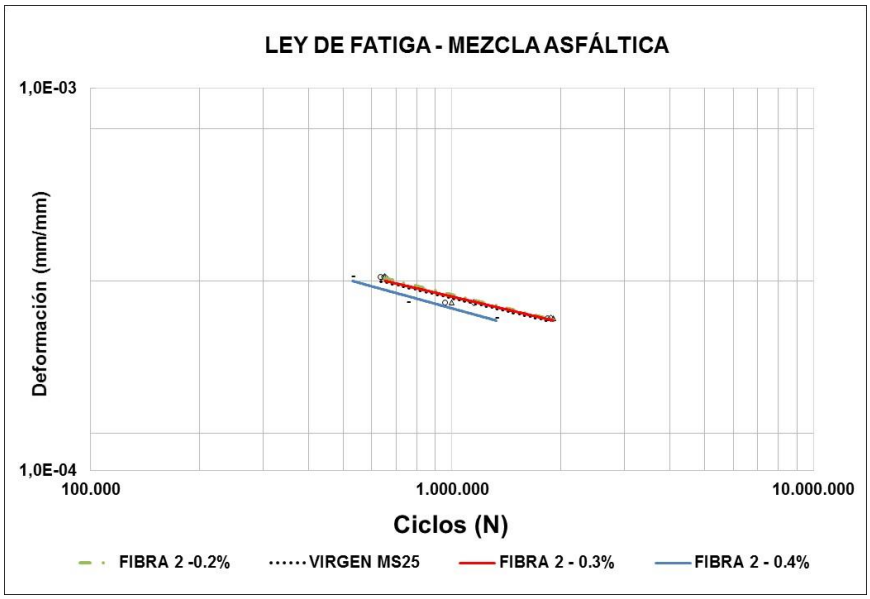


Figura 182. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 2.

En la figura 183, leyes de fatiga de mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 3 a diferentes porcentajes, se puede observar que referente a la deformación al millón de ciclos ($\varepsilon 6$), la dosificación al 0.03% aumenta su valor y a la vez, disminuye la pendiente, favoreciendo el comportamiento a fatiga de la mezcla. En relación a las otras dosificaciones, 0.04% y 0.05%, en el caso de 0.04%, la pendiente y deformación disminuye y para 0.05%, la pendiente aumenta y la deformación disminuye. Estos comportamiento evidencian que la dosificación 0.04% puede ser favorable cuando se tienen muchos ciclos de carga, dado que disminuye la pendiente. En el caso del 0.05%, ninguna de las dos variables es favorable.

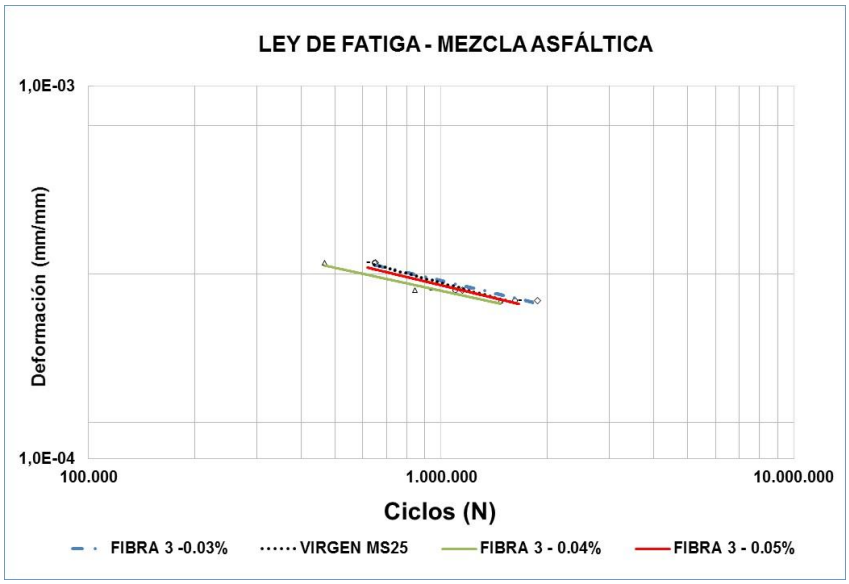
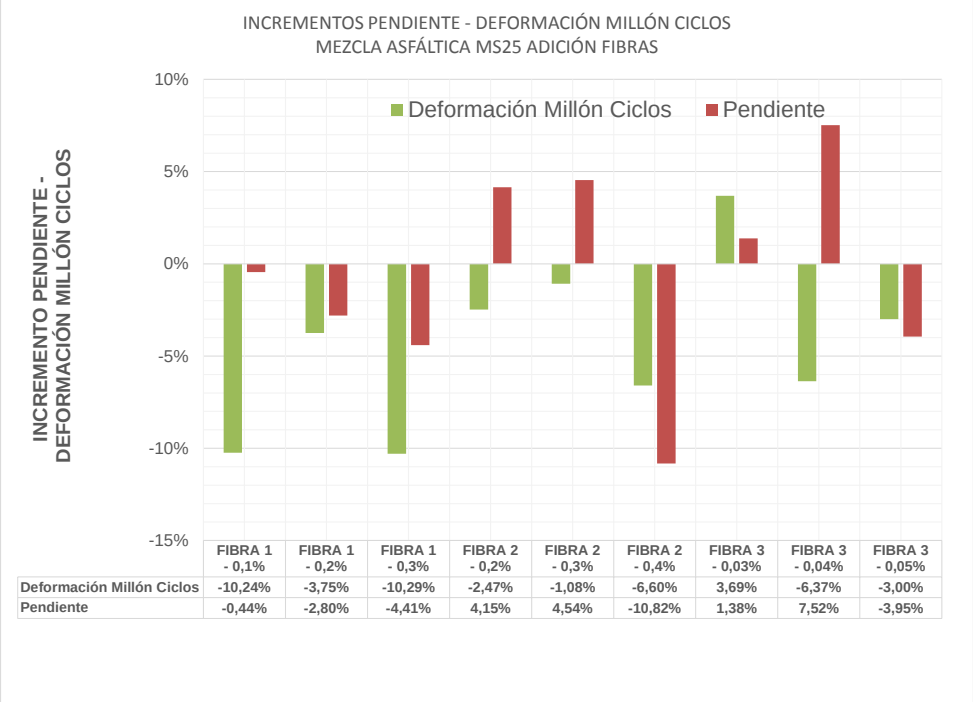


Figura 183. Leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 3.

En la figura 184, incrementos de la deformación al millón de ciclos y pendiente de las mezclas asfálticas con granulometría MS25, con y sin adición de fibras 1, 2 y 3 con diferentes porcentajes, se puede evidenciar que para algunos porcentajes de las fibras 2 y 3, presentan incremento de la pendiente y sus magnitudes oscilan entre 4% y 7%. Referente a la deformación al millón de ciclos, solamente para la fibra 3, en la dosificación 0.03%, se presenta un incremento del 3.7%. Con los resultados, se puede observar que las fibras, irrelevantemente su origen y dosificación poco favorecen el comportamiento a fatiga de las mezclas MD25.



	FIBRA 1 - 0,1%	FIBRA 1 - 0,2%	FIBRA 1 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,2%	FIBRA 2 - 0,3%	FIBRA 2 - 0,4%	FIBRA 3 - 0,03%	FIBRA 3 - 0,04%	FIBRA 3 - 0,05%
Deformación Millón Ciclos	-10,24%	-3,75%	-10,29%	-2,47%	-1,08%	-6,60%	3,69%	-6,37%	-3,00%
Pendiente	-0,44%	-2,80%	-4,41%	4,15%	4,54%	-10,82%	1,38%	7,52%	-3,95%

Figura 184. Incrementos deformación millón de ciclos y pendiente leyes de fatiga mezcla asfáltica con granulometría MS25 y adición fibra 1, 2 y 3 a diferentes dosificaciones.

Finalmente, el comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas MD12 y MS25, con y sin adición de fibras 1, 2 y 3, muestran que su aplicación es más favorable para mezclas cerradas MD12 y especialmente el uso de la fibra tipo 3. Los resultados para la mezcla semicerrada, MS25, no son satisfactorios.

8. Equipo de trabajo

Para el desarrollo de la metodología, programa experimental, caracterización de los materiales, ejecución de los ensayos mecánicos de las mezclas de concreto hidráulico y el desempeño mecánico y dinámico de las mezclas asfálticas, el grupo de trabajo fue:

- Ingeniero Oscar Javier Reyes Ortiz, experto en pavimentos y director del proyecto. Su función principal es dirigir el proyecto, analizar las variables de estudio y tomar decisiones acerca de la ejecución de ensayos, interpretación y resultados.

- Ingeniero Javier Fernando Camacho Tauta, experto en materiales. Su función dentro del proyecto es apoyar en el análisis y comportamiento de los materiales empleados en la investigación.

- Ingeniera Ángela Marcela Fajardo Mejia, experta en electrónica. Su función principal es apoyar con la captura y análisis de la información tomada por los equipos y sensores. Así mismo, apoyar todo lo relacionado con la adecuada toma de la información de los sistemas electrónicos.

- Ingeniero Germán Leandro Vargas Fonseca, investigador Junior. Función principal es la ejecución de ensayos de laboratorio y la verificación para el correcto desempeño de todo el sistema mecánico y electrónico de los equipos de ensayos.

- Auxiliares de investigación Franceth Castellanos B., Ándres Tovar R. y Jorge Ascencio Castañeda. Son ingenieros de apoyo en la fabricación y ejecución de los ensayos de laboratorio.

- Técnico laboratorista Nelsón Armando Sanchéz. Función principal la fabricación de probetas y toma de datos de ensayos.

9. Conclusiones y recomendaciones

Con base en las diferentes actividades realizadas en el convenio interadministrativo 1819 de 2014, suscrito entre la Universidad Militar Nueva Granada y el Instituto de Desarrollo Urbano-IDU, que inició en enero de 2015 con una revisión bibliográfica nacional e internacional del estado del conocimiento de mezclas asfálticas y concretos hidráulicos modificadas con fibras, siguió en febrero con la selección, adquisición y caracterización de materiales a utilizar en la investigación (agregados, cemento y asfalto), continuó en marzo con la definición de las fibras y dosificación a emplear en el estudio, prosiguió entre marzo y agosto con los diseños de mezcla de concretos hidráulico y mezclas asfálticas con y sin adición de fibras, con la fabricación de probetas de concreto hidráulico y mezclas asfálticas con y sin adición de fibras y con la ejecución de ensayos mecánicos a las probetas de concreto hidráulico y dinámicos a las mezclas asfálticas, para finalmente, entre septiembre y noviembre terminar con el análisis de los ensayos realizados y las conclusiones y recomendaciones de la investigación. Por último, el estudio buscó establecer la incidencia de las fibras en las propiedades de los materiales que se emplean en la construcción de vías en la ciudad de Bogotá, de las cuales se puede manifestar:

- En la literatura se presentan tres grandes grupos de fibras para modificar el comportamiento de las mezclas asfálticas y de concreto. Las primeras de origen natural, que dadas sus características heterogéneas generan en oportunidades beneficios y en otros no, razón por la cual es difícil establecer si es viable su aplicación en pavimentos. El segundo tipo de fibras son denominadas sintéticas, cuyo origen en la mayoría de los casos provienen del petróleo y se clasifican en poliéster, acrílicas, polímeros, polipropileno, aramida entre otras. Estas fibras en las mezclas asfálticas han tenido buenos resultados, dado que generan microestructuras al interior de la matriz agregado-asfalto, lo cual conduce a mejorar su resistencia a la fatiga, a disminuir la deformación plástica y susceptibilidad al daño por humedad e incrementar sus propiedades mecánicas. En el caso de mezclas de concreto hidráulico, las fibras sintéticas han sido utilizadas como refuerzo secundario o retardantes de fisuración, lo cual ha mejorado la vida útil de las estructuras. Finalmente, el último grupo de fibras son las metálicas, de origen industrial o de desperdicio de materiales. Su mayor uso ha sido como refuerzo en losas de concreto, incrementando la resistencia a flexión y compresión. Las experiencias en mezclas asfálticas con fibras metálicas han sido pocas y sus beneficios poco satisfactorios, razón por la cual no se contemplaron en la investigación.

- El estado del conocimiento y la respuesta de los materiales asfálticos y de concreto hidráulico ante la adición de fibras de diferente origen, recomendó para el proyecto de investigación introducir tres diferentes fibras por tipo de mezcla a fabricar (concreto hidráulico y cemento asfáltico). De igual manera, colocar tres porcentajes diferentes por fibra, de tal modo que se pudiera evaluar la incidencia de la fibra y el porcentaje de la misma en la mezcla asfáltica o de concreto hidráulico. Las fibras seleccionadas para modificar las mezclas fueron:

  Mezclas de concreto hidráulico:

- Fibras metálicas de acero, origen industrial, contenido bajo de carbono, forma tipo alambre y dimensiones de 50 mm de longitud y un diámetro máximo de 1 mm. Así mismo, en los extremos de la fibra de acero deberá existir curvatura tipo gancho.

- Fibras metálicas de acero en forma de lámina, origen industrial, contenido bajo de carbono y dimensiones de 50 mm de longitud y 1 mm aproximado de espesor. Las láminas deberán ser corrugadas.

- Fibras sintéticas compuestas por polipropileno y polietileno virgen, monofilamento y multifilamentos, con longitudes de 50 mm.

Mezclas de concreto asfáltico

- Fibras sintéticas compuestas de aramida, poliolefinas y otras fibras de polímero, cuya longitud es 19 mm, punto de fusión entre 100 y 427 °C, el cual depende de la característica de las fibras que componen el material. Así mismo, el módulo de elasticidad de las fibras oscila entre 0.48 y 2.76 GPa.

- Fibras sintéticas compuestas de polipropileno homopolímero virgen, sin materiales de oleofina y multifilamento, con longitud aproximada de 12 mm y punto de fusión 162°C.

- Fibras sintéticas de polipropileno y polietileno, monofilamento de longitud máxima 50 mm, punto de fusión 160°C y módulo de elasticidad 9.5 GPa.

- La caracterización mecánica de los materiales de agregado, cemento y asfalto utilizados en la investigación, cumplen con los requerimientos de las especificaciones técnicas del Instituto de Desarrollo Urbano (ET-IDU-2011), razón por la cual, se emplearon para el diseño de las mezclas (concreto hidráulico y concreto asfáltico) y construcción de probetas con y sin modificación de fibras de diferentes orígenes y dosificaciones.

- Los diseños realizados para las dos mezclas asfálticas de la investigación (MD12 y MS25), establecieron un porcentaje óptimo de asfalto de 5.5%. Sin embargo al diseñar las mezclas modificadas con la fibra compuesta por el homopolímero virgen (fibra 2), se presentó un incremento del contenido de asfalto, llegando este al 5.9%. Se resalta que para las mezclas con fibras de polipropileno / polietileno, así como las de aramida, poliolefinas y otras fibras de polímero, no existió un incremento significativo del contenido óptimo de asfalto, dado que este oscilo entre 5.5 y 5.6%. Una vez definidos los porcentajes óptimos de asfalto, la densidad volumétrica y la relación de vacíos de las mezclas del estudio, se procedió a fabricarlas en el compactador giratorio con las especificaciones obtenidas, de tal forma que se controlaran algunas variables en la respuesta mecánica y dinámica de las mismas.

- Los diseños de resistencia de los concretos hidráulicos con Mr=4.0MPa y Mr=4.5MPa, con y sin adición de fibras, no mostraron cambios significativos en la dosificación y especialmente en la relación agua – cemento. Este comportamiento se debe esencialmente al ser las fibras metálicas y sintéticas impermeables.

- Los testigos fabricados para evaluar las propiedades del concreto hidráulico con y sin fibras (módulo de elasticidad, módulo de rotura y resistencia a la compresión simple) y con resistencia Mr=4.0MPa y Mr=4.5MPa, fueron curados a 3, 7, 14, 28 y 56 días, de tal manera que se pudiera evaluar la incidencia de la resistencia en el tiempo de los concretos vírgenes y modificados.

- Las propiedades determinadas en los diseños Marshall para las mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, con y sin adición de fibras, establecieron que sin importar el origen y porcentaje de fibra utilizadas, se cumplen los requerimientos establecidos en las especificaciones técnicas del IDU (ET-IDU-2011). De otra parte, la densidad bulk determinada a las diferentes mezclas asfálticas, evidencia que no existe un descenso significativo en su magnitud y por ende, poca afectación en este parámetro. Así mismo, se observó que la relación de vacíos y el flujo de las mezclas con fibras, tienen valores dentro del rango estipulado en las especificaciones y muy cercanos a las muestras patrón (sin fibras). Finalmente, la estabilidad de las mezclas se ve fuertemente influenciada por las fibras, al tener incrementos en la resistencia.

- La relación estabilidad / flujo de las probetas Marshall ensayadas, manifiestan que las mezclas MD12 y MS25, sin adición de fibras, presentan magnitudes dentro del rango de la especificación para tráfico alto. Se resalta que la mezcla MD12 tiene mayor rigidez que la MS25, al tener una magnitud mayor. De otra parte, las mezclas asfálticas MD12, modificadas con fibras 1 y 2, cumplen para tráfico alto y algunas para tráfico medio. Así mismo, la mezcla MD12 con adición de fibra 3, presenta la relación más elevada, sin embargo esta dentro del rango establecido en la especificación. Con respecto a las mezclas asfálticas MS25 con adición de fibras 1 y 2, estas cumplen con la exigencia de la especificación para tráfico alto. Así mismo, lo observado en la mezcla MD12 con fibras 3, la mezcla MS25 tiene la relación mayor, pero dentro del rango estipulado por la norma.

- Con base en la relación de estabilidad/flujo, se puede establecer que irrelevantemente la mezcla asfáltica estudiada (MD12 y MS25), adicionar fibra 3, genera rigidez en la mezcla con respecto a la muestra patrón, pero siempre dentro de los rangos estipulados en las especificaciones del IDU.

- La resistencia del módulo de elasticidad promedio de las mezclas de concreto hidráulico para los diseños de Mr=4.0 MPa, evidenciaron que existe un incremento del módulo, irrelevantemente el periodo de curado, el tipo de fibra y porcentaje utilizado. Los incrementos obtenidos para el periodo de curado de 28 y 56 días, fueron entre 1 y 7% para la fibra 1, 7 y 11 % para la fibra 2 y 14 y 21% para la fibra 3. De otra parte, las mezclas de concreto hidráulico para los diseños de Mr=4.5MPa, mostraron que para las fibras tipo 1 y 2, decrece el módulo (entre 4 y 9%), mientras para las fibras 3, aumenta irrelevantemente su dosificación y periodo de curado (entre 1 y 8%). De igual manera, se observó en la resistencia promedio a la compresión simple, que los diseños de mezcla con Mr=4.0MPa, presentan incrementos para todas las fibras y dosificaciones utilizadas, siendo estos entre 4 y 8% para la fibra 1, 24 y 34% para la fibra 2 y entre 36 y 44% para la fibra 3. De otra parte, las mezclas con diseño de Mr=4.5MPa, nuevamente presentan descensos en la resistencia para las fibra 1 (entre 19 y 22%) y fibra 2 (1 y 24%) e incrementos para la fibra 3 (5 y 13%), irrelevantemente su dosificación y periodo de curado. Por último, el comportamiento al módulo de rotura

promedio para los dos diseños de mezcla (Mr=4.0MPa y Mr=4.5MPa), muestra que el uso de fibras, irrelevantemente su origen y dosificación, incrementa la resistencia entre 5 y 27% para el concreto de 4.0 MPa y entre 9 y 25% para la resistencia de 4.5 MPa. Es importante resaltar, que dichos incrementos son mayores para los diseños de mezcla con Mr=4.0MPa y el empleo de fibras 3, irrelevantemente su dosificación. Estos resultados muestran que el mayor beneficio se obtiene con el uso de fibras 3, especialmente a 0.04% y es desfavorable para las fibras 1 y 2.

- De la resistencia a la compresión simple, módulo de elasticidad y módulo de rotura de los concretos evaluados (Mr= 4.0 y 4.5 MPa) con y sin adición de fibras, se observa que los mayores beneficios en incremento de los parámetros estudiados al adicionar fibras en diferentes porcentajes y características, corresponden al concreto con resistencia de diseño 4.0 MPa, irrelevantemente el periodo de curado utilizado. En el caso del concreto con resistencia Mr=4.5 MPa, el beneficio se observa para la fibra 3.

- Los parámetros evaluados de resistencia de los concretos estudiados con y sin adición de fibras, muestran que las fibras metálicas generan incrementos para los concretos con Mr=4.0 MPa, mientras para el concreto de Mr=4.5 MPa, se obtienen descensos. Estos resultados ponen de manifiesto que el beneficio de adición de fibras metálicas se produce al tener resistencias de diseño bajas y no altas. En el caso de la adición de fibras sintéticas, los incrementos son superiores a las fibras metálicas y son favorables para los dos diseños evaluados (Mr=4.0 y 4.5 MPa). Sin embargo, se resalta que los beneficios son mayores para el caso de Mr=4.0 MPa.

- La respuesta a la deformación plástica de las mezclas asfálticas con granulometrías MD12 y MS25, modificadas con fibras de diferente origen (tipo 1,2 y 3) y dosificación a tres porcentajes diferentes, evidencian que cumplen con los requerimientos de las especificaciones técnicas del IDU (ET-IDU-2011) y que las fibras 2 y 3, irrelevantemente su dosificación, disminuyen la velocidad de deformación de las mezclas y que la fibra 1, desfavorece dicha velocidad. Se resalta que los mayores beneficios se obtienen con la fibra 3 y a la dosificación de 0.05%.

- La resistencia conservada de las mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, cumplen con la especificación técnica del IDU, cuyo requisito es tener mínimo 80% de resistencia conservada. Referente a las mezclas asfálticas MD12 modificadas con fibras, se puede establecer que especialmente la adición de la fibra 1, presenta valores cercanos o levemente inferiores al 80%, mostrando su susceptibilidad al agua. De otra parte, las diferentes dosificaciones de fibras 2 y 3 (exceptuando 0.03%), cumplen con el requisito de las especificaciones. Las mezclas con granulometría MS25 y modificadas con fibras, presentan para las diferentes fibras y dosificaciones, valores cercanos y superiores a 80%, cumpliendo con el requisito de las especificaciones del IDU. Solamente, la fibra 3 al 0.05%, tiene un valor levemente inferior al límite, el cual es 77.9%.

- Los módulos resilientes de las mezclas asfálticas con granulometría MD12, modificados con diferentes fibras y porcentajes y ensayados a múltiples temperaturas y frecuencias, muestran que las fibras 1 solo incrementan el módulo para la dosificación del 0.1%, irrelevantemente la temperatura y frecuencia utilizada. En el caso de la fibra 2, las dosificaciones del 0.2% y 0.3%, evidencian incrementos en el módulo.

Finalmente, la fibra 3, irrelevantemente la dosificación, frecuencia y temperatura de ensayo, incrementa el módulo, siendo mayor máximo para la dosificación del 0.03%. De otra parte, las mezclas asfálticas con granulometría MS25, modificados con diferentes fibras y porcentajes y ensayados a múltiples temperaturas y frecuencias, muestran que la fibra 1, para la dosificación 0.2%, solamente genera incrementos en el módulo, indiferentemente la tema y frecuencia de ensayo. En el caso de la fibra 2, los incrementos se logran para la dosificación del 0.3%, sin importar la temperatura y frecuencia de ensayo. Finalmente, la fibra 3, para las dosificaciones de 0.04% y 0.05%, incrementan el módulo irrelevantemente su temperatura y frecuencia de ensayo.

- El comportamiento a fatiga de las mezclas asfálticas modificadas con fibras de diferentes características y porcentajes, evidencian que las mezclas con granulometría MD12 y modificadas con fibras 2 y 3, irrelevantemente su dosificación, incrementan la deformación al millón de ciclos y disminuyen la pendiente, haciéndolas más resistentes al efecto de fatiga. Así mismo, la fibra 1, genera efectos negativos en la mezcla, dado que reduce las deformaciones e incrementa la pendiente. De otra parte, las mezclas asfálticas con granulometría MS25 y modificadas con fibras de diferentes características y porcentajes, muestran que las fibras 1,2 y 3 (exceptuando tipo 3 al 0.03%), generan descensos en la deformación al millón de ciclos, reduciendo la vida útil de la mezcla. Con respecto a la pendiente, esta solo se reduce en la fibra 2 para las dosificaciones 0.2% y 0.3% y en la fibra 3, para la adición del 0.03%.

- En el proceso de fabricación de las mezclas de concreto hidráulico, se observó que existen diferentes formas y etapas donde se puede introducir las fibras en la generación del concreto, tales como al inicio (se colocan en la mezcladora), durante la mezcla de agregado fino y grueso, al momento de introducir el cemento y el agua o al final. Después de realizar diferentes investigaciones del proceso y verificar en la fabricación del concreto, se llegó a la conclusión que las fibras metálicas se deberían adicionar al final o antes de introducir el agua y cemento. Para el caso de la investigación se realizó al final, evitando la aglutinación de componentes pro las fibras. En el caso de las fibras sintéticas, el proceso establece que se debe hacer al final. El tiempo de mezclado para todas las fibras, se fijó máximo en 2 minutos para evitar la segregación de las fibras dentro de la masa de concreto. Es importante resaltar, que los tiempos de mezclado son para una mezcladora de baja capacidad (1 o 2 bultos de cemento).

- La adición de fibras sintéticas en la fabricación de las mezclas asfálticas con granulometría MD12 y MS25, se realizó por vía seca. Es decir, se introdujeron a la mezcladora los agregados a la temperatura de diseño e inmediatamente las fibras (irrelevantemente la fibra y porcentaje). El proceso de mezclado duró dos minutos y acto seguido se introdujo el asfalto, para de esta manera obtener la mezcla asfáltica del estudio.

- Las fibras sintéticas 1 y 2, utilizadas en la fabricación de mezclas asfálticas MD12 Y MS25, presentaron en el proceso de mezclado, un comportamiento altamente viscoso, al alcanzar valores cercanos a su punto de fusión. Dicho comportamiento generó unión entre las diferentes partículas de agregados que conformaban la mezcla asfáltica. En el caso de la fibra 3, al poseer diferentes características de fibras y diferentes

temperaturas de fusión, algunas en el proceso de mezclado se comportaron viscosamente, otras plásticamente y otras no tuvieron modificación. Este triple comportamiento observado en las fibras que conforman la fibra 3, genero mayores uniones entre los agregados y el asfalto de la mezcla.

- Con base en los resultados obtenidos de las propiedades de las mezclas de concretos hidráulicos a diferentes periodos de curado, diferentes resistencias de diseño y adición de diferentes tipos de fibras y porcentajes, se puede establecer que la fibra 3, a la dosificación 4.0%, genera los mayores beneficios en las propiedades de mezcla, sin importar la resistencia de diseño y periodo de curado. Así mismo, que las fibras 1, no favorecen el comportamiento de las propiedades del concreto, indiferentemente de la dosificación o ensayo ejecutado. De otra parte, en las mezclas asfálticas, irrelevantemente la granulometría (MD12 o MS25), las fibras 3, en la dosificación de 0.03%, incrementa el módulo resiliente, disminuye la deformación plástica, mejora el comportamiento a fatiga y reduce la susceptibilidad al agua, mejorando significativamente las propiedades de las mezclas asfálticas y haciendo que tengan comportamientos favorables ante el flujo vehicular, condiciones climatológicas entre otras variables.

Los resultados de la investigación ponen de manifiesto que es viable y favorable el uso de fibras sintéticas y para algunos casos fibras metálicas en la fabricación de pavimentos rígidos, al encontrar incrementos en la resistencia a la compresión simple, módulo de rotura y módulo de elasticidad para concretos hidráulicos (resistencia de diseño Mr=4.0 y 4.54 MPa). De otra parte, en pavimentos flexibles, se evidenció que adicionar fibras sintéticas incrementa el módulo resiliente y la resistencia a la fatiga y disminuyen la deformación plástica y susceptibilidad al daño por humedad, mostrando la favorabilidad del uso de fibras en pavimentos flexibles.

De otra parte, para profundizar en el comportamiento de las mezclas de concreto hidráulico modificadas con fibras sintéticas y metálicas y que presentaron los mejores resultados, es necesario realizar tramos experimentales a escala real e instrumentados, donde se evidencien otras variables como la aplicación de cargas en ejes sencillos y tandem, la simulación de condiciones medioambientales de lluvia, viento y radiación solar y especialmente procesos constructivos de fabricación, colocación y curado. Todas estas variables que son críticas a la hora de evaluar el material, crear especificaciones definitivas y realizar pavimentos a escala en la ciudad, se vuelven necesarias por la escala del laboratorio y los procesos reales. Sin embargo, es importante resaltar que parte de las especificaciones y procesos constructivos se pueden evidenciar con los ensayos realizados, tales como:

- Las fibras, irrelevantemente sean sintéticas o metálicas, se deben introducir al final del proceso de mezclado, con el objeto de evitar segregación de las mismas. Así mismo, las dimensiones de las fibras deberán estar acordes con los espesores de la losa de concreto a construir, para evitar posibles uniones de las fibras y por ende, fisuras en el concreto.

- El tiempo de mezclado del concreto y las fibras, es una variable crítica en el proceso de fabricación. En el caso de la mezcladora de laboratorio fue de 2 minutos máximo y para un camión mezclador, se debe cuantificar ese tiempo cuando se hagan pruebas a

escala real. Dicho valor dependerá de la capacidad del camión mezclador y las revoluciones de mezclado.

- El asentamiento determinado con el cono de Abrams, debe ser igual para un concreto convencional. Es importante verificarlo en el proceso constructivo, ya que afecta significativamente la manejabilidad del concreto.

- La vibración del concreto mediante varilla y martillo en la fabricación de los testigos a ensayar en el laboratorio, identifico que se debe poner atención al proceso, ya que en oportunidades la falta de control, crea segregación de las fibras y por ende, cambios en la resistencia final.

- El proceso de desencofrado de las probetas, deberá ser mínimo 24 horas después de fabricadas las probetas y su proceso de curado deberá ser siempre manteniéndolas húmedas en cuarto húmedo o piscinas de curado

- La ejecución de los ensayos se deberá hacer, retirando las probetas entre dos y cuatro horas de la piscina o cuarto húmedo. Se deberá tener extremo cuidado en el transporte y colocación de los especímenes en la prensa de ensayo.

De otra parte, estos tramos a escala real, son aconsejables también para las mezclas asfálticas modificadas y que evidenciaron los mejores comportamientos. En el caso de las mezclas asfálticas, se resaltar que parte de las especificaciones y procesos constructivos se pueden evidenciar con los ensayos realizados, tales como:

- El proceso de mezclado de las fibras debe ser en seco, es decir, primero se genera una mezcla entre el agregado y las fibras a la temperatura de compactación y posteriormente se introduce el asfalto a la mezcla.

- El tiempo de mezclado de los agregados y las fibras, debe ser máximo dos minutos, tiempos necesarios para que las fibras debido al calor creen comportamientos viscosos o plásticos, necesarios para unir los agregados.

- El proceso de fabricación de los testigos de las mezclas asfálticas, debe ser por amasado o compactación con rodillo, para garantizar la densidad volumétrica de la mezcla y la buena compactación.

- Los procesos de extracción de las probetas, deberán ser a las 24 horas de fabricadas, con el objeto de evitar alguna rotura en su extracción o reacciones de las fibras con los agregados o el asfalto.

Por último, es importante especificar unas características mínimas de las fibras metálicas y sintéticas, de tal manera, que la respuesta en las mezclas asfálticas y de concreto hidráulico sean las más favorables. En el caso de las fibras metálicas utilizadas en el concreto hidráulico, estas deben tener una longitud entre dos y tres veces el diámetro máximo de la partícula que conforma el agregado. Así mismo, si el concreto va a ser bombeado por tubería, las fibras deberán ser máximo 2/3 partes el diámetro del tubo. Respecto a la resistencia mínima a la tensión de las fibras, estas deberán ser de 150 GPa y la absorción nula. De otra parte, las fibras sintéticas usadas en concreto hidráulico

deberán tener una absorción de agua nula o casi nula, de tal manera que no altere la relación agua/cemento y por ende la resistencia de la mezcla de concreto. Referente a la longitud de la fibra, es aconsejable una relación entre una y tres veces el diámetro de la partícula de agregado pétreo mayor, siendo más favorable la relación uno a tres entre diámetro partícula y longitud de fibra. Las características de la temperatura de fusión e ignición, son indiferentes en la fabricación de mezclas de concreto hidráulico. En el caso de las mezclas asfálticas, las fibras sintéticas deberán tener una relación entre una y tres veces la longitud de la fibra y el diámetro de la partícula mayor del agregado. De otra parte, la resistencia mínima de las fibras será de 0.4 GPa y su temperatura de fusión igual o superior a 100°C, todo esto con el objeto de crear en el proceso de mezclado en seco, uniones entre los agregados y las fibras. Así mismo, la temperatura de ignición o punto de llama de las fibras, deberá ser superior a los 250°C.

Finalmente, el estudio mostro las bondades de algunas fibras sintéticas utilizadas para la fabricación de mezclas de concreto con agregado virgen y diferentes resistencias de diseño. Sin embargo, bajo los nuevos conceptos de ahorro energético, disminución de gases de efecto invernadero y uso racional de los materiales no renovables del medio ambiente, se debería iniciar a estudiar mezclas de concreto hidráulico con desechos de agregados y con la experiencia de la respuesta del uso de fibras. Así mismo, iniciar a plantear estudios enfocados al empleo de pavimentos reciclados en altos contenidos y la adición de fibras, todo esto para crear pavimentos más amigables con el medio ambiente.

10. Bibliografía

[1] Climatic effects on pavement and geotechnical infrastructure. ASCE proceedings of the international symposium of climatic effects on pavement and geotechnical infrastructure. (2013) Jenny Liu, Peng Li, Xioong Zhang and Baoshan Huang.

[2] Stresses and strains in asphalt surfacing pavements. South African Transport Conference Organised by: Conference Planners 'Action in Transport for the New Millennium' South Africa, 17 – 20 July 2000 Conference Papers Produced by: Document Transformation Technologies. (2000) Lubinda F. Walubita and Martin F.C. Van De Ven.

[3] AENOR – Asociación Española de Normalización y Certificación. Normas UNE-EN-12697. 2003.

[4] Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales de carreteras. 2007. Instituto Nacional de Vías – INVIAS.

[5] Análsiis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña. (2004). Alejandro Padilla Rodríguez.

[6] Diseño, construcción y mantenimiento de paviemntos de concreto. Instituto Colombiano de productores de cemento. (2000). Cipriano Londoño .

[7] Sensitivy of warm mix asphalt to temperature, binder content, and laboratory stripping performance. Proquest Editors. (2011) Annette Porter.

[8] Diseño, construcción y mantenimiento de pavimentos de concreto. Instituto Colombiano del cemento LCPC. 2004. Cipriano Londoño N.

[9] Mezclas semicalientes. Proyecto Fenix. XV Congreso iberolatinoamericano del asfalto. 2009. Lisboa, Portugal. Oscar Reyes Ortiz, Felix Pérez Jimenez, Ramón Botella Nieto y Rodrigo Miro Recasens.

[10] Advances interlaboratory testing and evaluation of bituminous materials. Rilem state of the art reports. Springer. (2013). Manfred N. Partl, Huseein Bahia, Francesco Canestrari, Chantal de la roche, Herve di Benedetto, Herald Piber y Dariusz Sybilski.

[11] Diseño racional de pavimentos. Editorial Escuela Colombiana de Ingeneiria. 2003. Fredy Reyes Lizcano.

[12] Suitability of Concrete Reinforced with Synthetic Fiber for the Construction of Pavements. Journal of Scientific and industrial research. (2014) Vol 73. Rakesh, Kumar., Parkaj, Goel., Renue Mathur

[13] Study of reinforced bituminous concrete. International Journal of engineering research and development. (2014) Vol 10. Remadevi, M., Anjali G. Pilalri, Elizabeth Baby George.

[14] Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review. Journal Construction and Building Materials (2010) Sayyed Mahdi Abtahi, Mohammad Sheikhzadeh, Sayyed Mahdi Hejazi

[15] Effect of polyethylene on life of flexible pavements. Journal Construction and Building Materials. (2009). A.I. Al-Hadidy, Tan Yi-qiu

[16] Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures. Journal of Materials and design (2009). Huaxin Chen, Qinwu Xu, Shuanfa Chen y Zhengqi Zhang.

[17] Experimental study of fibers in stabilizing and reinforcing asphalt binder. Journal Fuel. (2010). Huaxin Chen y Qinwu Xu.

[18] Investigation of the dynamic and fatigue properties of fiber-modified asphalt mixture. International Journal of fatigue. (2009). Qunshan Ye, Shaopeng Wub, Ning Li.

[19] Mechanical performance evaluation of polyester fiber and SBR latex compound-modified cement concrete road overlay material. Journal Construction and Building Materials. (2014). Fang Xu , Mingkai Zhou , Jianping Chen , Shaoqin Ruan.

[20] The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. Journal composites: Part B. (2014). Hakan Bolat, Osman Simsek, Mustafa Çullu, Gökhan Durmus, Ömer Can

[21] Effect of the loading frequency on the compressive fatigue behavior of plain and fiber reinforced concrete. International Journal of fatigue. (2015). Arthur Medeiros, Xiaoxin Zhang, Gonzalo Ruiz, Rena C. Yu, Marta de Souza Lima Velasco

[22] Experiemntal Study: Fiber Reinforced Concrete. Average Residual Strength (ARS), according to ASTM C 1399-7a. Marco Antonio Carnio, Amauri Ernesto Gomes and Rosa C. Cecche. PUC Report.(2009) Pontificia Universita Católica, Brasil.

[23] Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement. Journal Construction and Building Materials. (2014). A. Nobili, L. Lanzoni, A.M. Tarantino

[24] Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de fibras, Revista ciencia e ingeniería neogranadina. (2005). Oscar Javier Reyes Ortiz, Juan Ricardo Troncoso Rivera y Fredy Alberto Reyes Lizcano.

[25] Strengthening of hot-mix asphalt mixtures reinforced by polypropylene-impregnated multifilament glass fibres and scraps. Journal Construction and Building Materials (2015). Pyeong Jun Yoo , Tae Woo Kim

[26] Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. Journal Construction and Building Materials (2012). M. Madhkhan, R. Azizkhani, M.E. Torki Harchegani

[27] Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres. Journal Engineering Structures (2012). Angela Gaio Graeff , Kypros Pilakoutas, Kyriacos Neocleous, Maria Vania N.N. Peres

[28] Evaluation on the usability of structure steel fiber-reinforced bituminous hot mixtures. Journal Construction and Building Materials (2014). Sedat Çetin

[29] Sika informaciones técnicas de concreto reforzado con fibras. (2010) SIKA. ISSN 0122-0594

[30] Ficha técnica Fibras TOC FIBRA 500. Toxement. (2011)

[30] Ficha técnica Fibras TUF – STAND SF. Toxement (2011).

[31] Ficha técnica Fibras Kaltex fibers. Durakal.

[32] Evaluation of fiber reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization test. Journal of testing and evaluation, vol 38. N. 4. (2010). Kamil Elias Kaloush, Krishan Prapoorma Biligiri, Valeed Abdelaziz and Maria Carolina Rodezco.

[33] Tecnología del concreto y del mortero. Biblioteca de la construcción. 2001. Edición Quinta. Diego Sánchez de Guzmán.

ANEXOS

ANEXO 1

Designación Comité Operativo

ANEXO 2

Convenio Interadministrativo 1819 de 2014 entre Universidad Militar Nueva Granada e Instituto de Desarrollo Urbano

ANEXO 3

Carta radicado entrega primer informe del convenio

ANEXO 4

Carta radicado entrega segundo informe del convenio

ANEXO 5

Carta radicado entrega tercer informe del convenio

ANEXO 6

Documento Socialización resultados “XX Simposio Colombiano de Ingeniería de pavimentos”

ANEXO 7

Asistencia Socialización resultados auditorio Instituto de Desarrollo Urbano

ANEXO 8

Caracterización del ligante asfáltico

ANEXO 9

Caracterización del agregado pétreo de las mezclas asfálticas

ANEXO 10

Caracterización del cemento Portland

ANEXO 11

Caracterización del agregado pétreo de las mezclas de concreto hidráulico

ANEXO 12

Diseños Marshall para las mezclas asfálticas de granulometría MD12 y MS25.

Anexo 13-A

Resultados de la Resistencia a la compresión simple, módulo rotura y elasticidad del concreto hidráulico con y sin adición de fibras. Resistencia de diseño Mr=4.0 MPa.

Anexo 13-B

Resultados de la Resistencia a la compresión simple, módulo rotura y elasticidad del concreto hidráulico con y sin adición de fibras. Resistencia de diseño Mr=4.5 MPa.

ANEXO 14 A

Resultados Resistencia deformación plástica del comportamiento de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras.

ANEXO 14 B

Resultados Resistencia conservada del comportamiento de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras.

ANEXO 14 C

Resultados leyes de fatiga del comportamiento de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras

ANEXO 14 D

Resultados módulo resiliente del comportamiento de mezclas asfálticas con y sin adición de fibras.