

**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE UNA  
MEZCLA ASFÁLTICA CONVENCIONAL CON UNA DE GRANO DE CAUCHO  
RECICLADO**

**Orjuela González Angie Vanessa**

**Jiménez Moreno José Luis**

**Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil**

**Dirigido por:**

**Juan Miguel Sánchez Durán, MSc**

**Universidad Santo Tomás**

**Ingeniería Civil**

**Bogotá D.C**

**2020**

### **Dedicatoria**

Queremos dedicarle este proyecto de grado a Dios que ha estado con nosotros en cada paso que damos, cuidándonos y dándonos fortaleza para continuar, a nuestras familias quienes a lo largo de nuestras vidas han velado por nuestro bienestar y educación, siendo nuestro apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se nos presentaba y a pesar de las diferentes adversidades nunca dejaron de apoyarnos.

### **Agradecimientos**

Este proyecto es el resultado del esfuerzo conjunto de nosotros. Por esto agradecemos a Dios el pionero de cada uno de nuestros logros, a nuestro director de grado, Ing. Juan Miguel Sánchez, que sin los múltiples consejos y tutorías brindadas no habría sido posible culminar este proyecto con excelente experiencia en el ámbito investigativo. A nuestros padres quienes a lo largo de toda nuestra vida han apoyado y motivado nuestra formación académica. Y finalmente un eterno agradecimiento a la Universidad la cual abrió sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo como profesionales íntegros.

### **Resumen**

El proyecto tiene como finalidad comparar las propiedades físico-mecánicas de una mezcla asfáltica convencional y una con grano de caucho reciclado (GCR); con base en resultados obtenidos en pruebas de laboratorio realizadas sobre mezclas fabricadas por distintas plantas que se dedican al mantenimiento de la malla vial de Bogotá. Esta investigación tuvo como contribución establecer respuestas a diferentes incógnitas que se presentan a la hora de elegir con cuál de las dos mezclas asfálticas beneficiaría más una obra vial evaluando su relación beneficio / costo y la reducción de espesores que se debería tener en cuenta cuando se diseña con la mezcla GCR.

**Palabras clave:** Pavimento, mezclas asfálticas, Mezcla asfáltica convencional, Mezcla con asfalto modificado con grano de caucho reciclado (GCR), y Mantenimiento vial.

## Tabla de contenido

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| Resumen                                              | 4   |
| Glosario                                             | 15  |
| Introducción                                         | 16  |
| Objetivos                                            | 18  |
| Objetivo general                                     | 18  |
| Objetivos específicos                                | 18  |
| Justificación                                        | 19  |
| Marco referencial                                    | 20  |
| Marco teórico                                        | 20  |
| Pavimento                                            | 20  |
| Mezcla asfáltica                                     | 21  |
| Mezcla asfáltica (Convencional)                      | 21  |
| Mezcla asfáltica GCR (Granulo de Caucho Reciclado)   | 22  |
| Ensayos                                              | 25  |
| Marco normativo                                      | 33  |
| Metodología                                          | 35  |
| Recolección de datos                                 | 37  |
| Planta 1                                             | 37  |
| Mezcla asfáltica GCR                                 | 38  |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 43  |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 49  |
| Planta 2                                             | 55  |
| Mezcla asfáltica GCR                                 | 56  |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 61  |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 67  |
| IDU-1397-17                                          | 73  |
| Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR) | 73  |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 78  |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 82  |
| IDU-1119-16                                          | 89  |
| Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR) | 90  |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 94  |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 98  |
| IDU-1662-14                                          | 105 |
| Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR) | 106 |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 108 |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 109 |
| Convenio la Felicidad                                | 111 |
| Mezcla asfáltica GCR                                 | 111 |
| Mezcla asfáltica MD12                                | 117 |
| Mezcla asfáltica MD20                                | 122 |

COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE UNA MEZCLA  
ASFÁLTICA CONVENCIONAL CON UNA DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO.

6

|                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------|-----|
| Análisis de resultados _____                                 | 127 |
| Tipo de asfalto _____                                        | 127 |
| Diseño preliminar de la mezcla _____                         | 128 |
| Ensayo de ley de fatiga _____                                | 129 |
| Ensayo de susceptibilidad al agua (Adherencia al agua) _____ | 132 |
| Ensayo de deformación plástica (Ahuellamiento) _____         | 134 |
| Ensayo de módulos (Resiliente - Dinámico) _____              | 136 |
| Diseño de la estructura del pavimento. _____                 | 141 |
| Método AASHTO 93 _____                                       | 142 |
| Método Racional _____                                        | 144 |
| Costo – Beneficio _____                                      | 145 |
| Conclusiones _____                                           | 149 |
| Recomendaciones _____                                        | 154 |
| Referencias bibliográficas _____                             | 155 |

### Lista de tablas

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Tabla 1.</i> Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....                 | 38 |
| <i>Tabla 2.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....                      | 38 |
| <i>Tabla 3.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....                            | 38 |
| <i>Tabla 4.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....                    | 39 |
| <i>Tabla 5.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....  | 40 |
| <i>Tabla 6.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....  | 41 |
| <i>Tabla 7.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....            | 41 |
| <i>Tabla 8.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 1 .....     | 41 |
| <i>Tabla 9.</i> Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....          | 42 |
| <i>Tabla 10.</i> Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....               | 44 |
| <i>Tabla 11.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....                    | 44 |
| <i>Tabla 12.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....                          | 44 |
| <i>Tabla 13.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....                  | 45 |
| <i>Tabla 14.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12. Planta1 ..... | 46 |
| <i>Tabla 15.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12. Planta1 ..... | 47 |
| <i>Tabla 16.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....          | 47 |
| <i>Tabla 17.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 1 .....    | 47 |
| <i>Tabla 18.</i> Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....        | 48 |
| <i>Tabla 19.</i> Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....               | 50 |
| <i>Tabla 20.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....                    | 50 |
| <i>Tabla 21.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....                          | 50 |
| <i>Tabla 22.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....                  | 51 |
| <i>Tabla 23.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta1 ..... | 52 |
| <i>Tabla 24.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta1 ..... | 53 |
| <i>Tabla 25.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....          | 53 |
| <i>Tabla 26.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 1 .....    | 54 |
| <i>Tabla 27.</i> Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....        | 54 |
| <i>Tabla 28.</i> Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....                | 56 |
| <i>Tabla 29.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....                     | 56 |
| <i>Tabla 30.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....                           | 56 |
| <i>Tabla 31.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....                   | 57 |
| <i>Tabla 32.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta2 .....  | 58 |
| <i>Tabla 33.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta2 .....  | 58 |
| <i>Tabla 34.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....           | 59 |

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 35. Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 2 .....        | 59 |
| Tabla 36. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2 .....             | 60 |
| Tabla 37. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD12. Planta 2.....                    | 61 |
| Tabla 38. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2 .....                       | 61 |
| Tabla 39. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2 .....                              | 62 |
| Tabla 40. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 2.....                      | 62 |
| Tabla 41. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12.<br>Planta2.....  | 64 |
| Tabla 42. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12.<br>Planta2.....  | 64 |
| Tabla 43. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2 .....             | 65 |
| Tabla 44. Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 2 .....        | 65 |
| Tabla 45. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2.....             | 66 |
| Tabla 46. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD20. Planta 2.....                    | 67 |
| Tabla 47. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....                       | 67 |
| Tabla 48. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....                              | 68 |
| Tabla 49. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 2.....                      | 68 |
| Tabla 50. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta<br>2..... | 70 |
| Tabla 51. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta<br>2..... | 70 |
| Tabla 52. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....             | 71 |
| Tabla 53. Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. Planta 2 .....        | 71 |
| Tabla 54. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2.....             | 72 |
| Tabla 55. Granulometría correspondiente para GCR, IDU-1397-17 .....                                  | 74 |
| Tabla 56. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1397-17 .....                     | 74 |
| Tabla 57. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1397-17 .....                            | 74 |
| Tabla 58. Resultados ensayo de fatiga para GCR, IDU-1397-17.....                                     | 75 |
| Tabla 59. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para GCR, IDU-1397-17.....                | 76 |
| Tabla 60. Relación de resistencia a la tensión .....                                                 | 76 |
| Tabla 61. Resultados ensayo de ahuellamiento para GCR, IDU-1397-17 .....                             | 76 |
| Tabla 62. Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. ....                  | 76 |
| Tabla 63. Resultados ensayo de módulo dinámico para GCR, IDU-1397-17 .....                           | 77 |
| Tabla 64. Granulometría correspondiente para MD12, IDU-1397-17 .....                                 | 78 |
| Tabla 65. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12, IDU-1397-17 .....                    | 79 |
| Tabla 66. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12, IDU-1397-17.....                            | 79 |
| Tabla 67. Resultados ensayo de fatiga para MD12, IDU-1397-17.....                                    | 79 |
| Tabla 68. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD12, IDU-1397-17 .....              | 80 |
| Tabla 69. Relación de resistencia a la tensión .....                                                 | 81 |
| Tabla 70. Resultados ensayo de ahuellamiento para MD12, IDU-1397-17 .....                            | 81 |
| Tabla 71. Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. ....                  | 81 |
| Tabla 72. Resultados ensayo de módulo de rigidez para (MD12) IDU-1397-17 .....                       | 82 |
| Tabla 73. Granulometría correspondiente para MD20, IDU-1397-17 .....                                 | 83 |
| Tabla 74. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1397-17 .....                    | 83 |



|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tabla 75.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1397-17.....                             | 83  |
| <i>Tabla 76.</i> Resultados ensayo de fatiga para MD20, IDU-1397-17.....                                     | 84  |
| <i>Tabla 77.</i> Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD20, IDU-1397-17 .....               | 85  |
| <i>Tabla 78.</i> Relación de resistencia a la tensión .....                                                  | 85  |
| <i>Tabla 79.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento para MD20, IDU-1397-17 .....                             | 86  |
| <i>Tabla 80.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. ....                   | 86  |
| <i>Tabla 81.</i> Resultados ensayo de modulo dinámico para MD20, IDU-1397-17 .....                           | 87  |
| <i>Tabla 82.</i> Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1397-17 .....                         | 88  |
| <i>Tabla 83.</i> Granulometría correspondiente para GCR, IDU-1119-16 .....                                   | 90  |
| <i>Tabla 84.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1119-16 .....                      | 90  |
| <i>Tabla 85.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1119-16 .....                             | 90  |
| <i>Tabla 86.</i> Resultados ensayo de fatiga para GCR, IDU-1119-16.....                                      | 91  |
| <i>Tabla 87.</i> Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para GCR, IDU-1119-16.....                 | 92  |
| <i>Tabla 88.</i> Relación de resistencia a la tensión .....                                                  | 92  |
| <i>Tabla 89.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento para GCR, IDU-1119-16 .....                              | 93  |
| <i>Tabla 90.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. ....                   | 93  |
| <i>Tabla 91.</i> Resultados ensayo de módulo de rigidez para GCR, IDU-1119-16.....                           | 93  |
| <i>Tabla 92.</i> Granulometría correspondiente para MD12, IDU-1119-16 .....                                  | 94  |
| <i>Tabla 93.</i> Resultados ensayo de fatiga para MD12, IDU-1119-16.....                                     | 95  |
| <i>Tabla 94.</i> Resultados ensayo de modulo dinámico para MD12, IDU-1119-16 .....                           | 96  |
| <i>Tabla 95.</i> Resultados ensayo de modulo resiliente para MD12, IDU-1119-16.....                          | 97  |
| <i>Tabla 96.</i> Granulometría correspondiente para MD20, IDU-1119-16 .....                                  | 99  |
| <i>Tabla 97.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1119-16 .....                     | 99  |
| <i>Tabla 98.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1119-16.....                             | 99  |
| <i>Tabla 99.</i> Resultados ensayo de fatiga para MD20, IDU-1119-16.....                                     | 100 |
| <i>Tabla 100.</i> Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD20, IDU-1119-16 .                  | 101 |
| <i>Tabla 101.</i> Relación de resistencia a la tensión .....                                                 | 101 |
| <i>Tabla 102.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento para MD20, IDU-1119-16.....                             | 102 |
| <i>Tabla 103.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. ....                  | 102 |
| <i>Tabla 104.</i> Resultados ensayo de modulo dinámico para MD20, IDU-1119-16.....                           | 103 |
| <i>Tabla 105.</i> Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1119-16.....                         | 104 |
| <i>Tabla 106.</i> Resultados ensayo de modulo resiliente para GCR, IDU-1662-14.....                          | 106 |
| <i>Tabla 107.</i> Resultados ensayo de modulo dinámico para MD12, IDU-1662-14.....                           | 108 |
| <i>Tabla 108.</i> Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1662-14.....                         | 110 |
| <i>Tabla 109.</i> Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad.....                 | 111 |
| <i>Tabla 110.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad .....                    | 112 |
| <i>Tabla 111.</i> Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad.....                            | 112 |
| <i>Tabla 112.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. La Felicidad.....                   | 112 |
| <i>Tabla 113.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad..... | 113 |
| <i>Tabla 114.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad .....          | 114 |
| <i>Tabla 115.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. La Felicidad .....    | 114 |

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tabla 116.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad .....           | 115 |
| <i>Tabla 117.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad .....           | 116 |
| <i>Tabla 118.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad .....                   | 117 |
| <i>Tabla 119.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. La Felicidad.....                  | 117 |
| <i>Tabla 120.</i> Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad..... | 118 |
| <i>Tabla 121.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad .....         | 119 |
| <i>Tabla 122.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. La Felicidad .....    | 120 |
| <i>Tabla 123.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad .....          | 120 |
| <i>Tabla 124.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad .....          | 121 |
| <i>Tabla 125.</i> Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad.....                    | 122 |
| <i>Tabla 126.</i> Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. La Felicidad.....                  | 123 |
| <i>Tabla 127.</i> Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad .....         | 124 |
| <i>Tabla 128.</i> Velocidad en $\mu\text{m}/\text{min}$ obtenida según especificación. La Felicidad .....    | 124 |
| <i>Tabla 129.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad .....          | 125 |
| <i>Tabla 130.</i> Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad .....          | 126 |
| <i>Tabla 131.</i> Características del asfalto en las mezclas GCR-MD12-MD20 .....                             | 127 |
| <i>Tabla 132.</i> Diseño preliminar de las mezclas GCR – MD12 – MD20 .....                                   | 128 |
| <i>Tabla 133.</i> IDU Tabla 510.9 .....                                                                      | 129 |
| <i>Tabla 134.</i> Datos específicos del ensayo de fatiga. ....                                               | 131 |
| <i>Tabla 135.</i> Resultados de módulo resiliente de las mezclas asfálticas. ....                            | 137 |
| <i>Tabla 136.</i> Resultados de módulo dinámico de las mezclas asfálticas. ....                              | 139 |
| <i>Tabla 137.</i> Diseño de las estructuras de pavimento (CBR 4%) mediante el método AASHTO 93. ....         | 143 |
| <i>Tabla 138.</i> Diseño de las estructuras de pavimento (CBR 2%) mediante el método AASHTO 93. ....         | 143 |
| <i>Tabla 139.</i> Resultados de diseño de estructura de pavimentos por método racional con CBR (%) 4,0.....  | 144 |
| <i>Tabla 140.</i> Resultados de diseño de estructura de pavimentos por método racional con CBR (%) 2,0.....  | 145 |
| <i>Tabla 141.</i> Costos de la vía según su estructura. (Nt: 3.500.000 CBR 4%).....                          | 146 |
| <i>Tabla 142.</i> Relación costo beneficio por año de vida útil (Nt: 3.500.000 CBR 4%) .....                 | 147 |
| <i>Tabla 143.</i> Costos de la vía según su estructura. (Nt: 3.500.000 CBR 2%).....                          | 148 |
| <i>Tabla 144.</i> Relación costo beneficio por año de vida útil (Nt: 3.500.000 CBR 2%) .....                 | 149 |

### Lista de gráficos

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 1 .....      | 40 |
| Gráfico 2. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 1 .....                   | 43 |
| Gráfico 3. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 1 .....                   | 43 |
| Gráfico 4. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....     | 46 |
| Gráfico 5. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....                      | 49 |
| Gráfico 6. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD12. Planta 1 .....                      | 49 |
| Gráfico 7. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....     | 52 |
| Gráfico 8. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....                      | 55 |
| Gráfico 9. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 1 .....                      | 55 |
| Gráfico 10. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 2. ....     | 57 |
| Gráfico 11. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 2 .....                  | 60 |
| Gráfico 12. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 2 .....                  | 61 |
| Gráfico 13. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 2. ....    | 63 |
| Gráfico 14. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con MD12. Planta 2 .....                 | 66 |
| Gráfico 15. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con MD12. Planta 2 .....                 | 67 |
| Gráfico 16. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....    | 69 |
| Gráfico 17. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....                     | 72 |
| Gráfico 18. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 2 .....                     | 73 |
| Gráfico 19. Tendencia de la ley de fatiga (GCR) IDU-1397-17 .....                          | 75 |
| Gráfico 20. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (GCR) IDU-1397-17 ..        | 77 |
| Gráfico 21. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (GCR) IDU-1397-17 .....    | 78 |
| Gráfico 22. Deformación vs Numero de repeticiones (MD12) IDU-1397-17 .....                 | 80 |
| Gráfico 23. Tendencia del módulo de rigidez (MD12) IDU-1397-17 .....                       | 82 |
| Gráfico 24. Tendencia de la ley de fatiga (MD20) IDU-1397-17 .....                         | 84 |
| Gráfico 25. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1397-17 .....    | 87 |
| Gráfico 26. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1397-17 .....   | 88 |
| Gráfico 27. Tendencia del módulo resiliente, módulo vs frecuencia (MD20) IDU-1397-17 ..... | 89 |
| Gráfico 28. Tendencia del módulo resiliente modulo vs temperatura (MD20) IDU-1397-17 ..... | 89 |
| Gráfico 29. Tendencia de la ley de fatiga (GCR) IDU-1119-16 .....                          | 91 |
| Gráfico 30. Tendencia del módulo de rigidez modulo vs temperatura (GCR) IDU-1119-16 .....  | 94 |
| Gráfico 31. Tendencia de la ley de fatiga (MD12) IDU-1119-16 .....                         | 95 |
| Gráfico 32. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1119-16 .....    | 96 |
| Gráfico 33. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16 .....   | 97 |

|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Gráfico 34. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1119-16               | 98  |
| Gráfico 35. Tendencia del módulo resiliente modulo vs temperatura (MD12) IDU-1119-16               | 98  |
| Gráfico 36. Deformación vs Numero de repeticiones (MD20) IDU-1119-16                               | 100 |
| Gráfico 37. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1119-16                  | 103 |
| Gráfico 38. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16                 | 104 |
| Gráfico 39. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1119-16               | 105 |
| Gráfico 40. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16               | 105 |
| Gráfico 41. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (GCR) IDU-1662-14                | 107 |
| Gráfico 42. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (GCR) IDU-1662-14                | 107 |
| Gráfico 43. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1662-14                  | 109 |
| Gráfico 44. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD12) IDU-1662-14                 | 109 |
| Gráfico 45. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1662-14               | 110 |
| Gráfico 46. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (MD20) IDU-1662-14               | 111 |
| Gráfico 47. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. La Felicidad               | 113 |
| Gráfico 48. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con GCR. La Felicidad                              | 115 |
| Gráfico 49. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con GCR. La Felicidad                              | 116 |
| Gráfico 50. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. La Felicidad              | 118 |
| Gráfico 51. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD12. La Felicidad                             | 121 |
| Gráfico 52. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD12. La Felicidad                             | 122 |
| Gráfico 53. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. La Felicidad              | 123 |
| Gráfico 54. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD20. La Felicidad                             | 125 |
| Gráfico 55. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD20. La Felicidad                             | 126 |
| Gráfico 56. Resultados de ensayo de fatiga de las mezclas asfálticas.                              | 130 |
| Gráfico 57. Comparación de la ley de fatiga entre las mezclas asfálticas.                          | 131 |
| Gráfico 58. Comparación ensayo de susceptibilidad al agua entre mezclas.                           | 133 |
| Gráfico 59. Cajas y bigotes, ensayo de susceptibilidad al agua.                                    | 133 |
| Gráfico 60. Velocidad de deformación plástica de las mezclas asfálticas.                           | 134 |
| Gráfico 61. Intervalo de deformación total de las mezclas.                                         | 135 |
| Gráfico 62. Comparación de resultados de ensayo de deformación plástica de las mezclas asfálticas. | 136 |
| Gráfico 63. Módulo resiliente de las mezclas asfálticas para 20°C.                                 | 137 |
| Gráfico 64. Módulo resiliente de las mezclas asfálticas a 5 Hz.                                    | 138 |

COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS DE UNA MEZCLA  
ASFÁLTICA CONVENCIONAL CON UNA DE GRANO DE CAUCHO RECICLADO.

13

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <i>Gráfico 65. Módulo dinámico de las mezclas asfálticas para 20°C .....</i> | <i>140</i> |
| <i>Gráfico 66. Módulo dinámico de las mezclas asfálticas para 5 Hz. ....</i> | <i>141</i> |

### **Lista de ilustraciones**

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Ilustración 1.</i> Llantas desechadas .....                                                                          | 23  |
| <i>Ilustración 2.</i> Mezcla asfáltica modificada con GCR por vía húmeda .....                                          | 24  |
| <i>Ilustración 3.</i> Mezcla asfáltica modificada con GCR por vía seca.....                                             | 25  |
| <i>Ilustración 4.</i> Módulo Resiliente .....                                                                           | 26  |
| <i>Ilustración 5.</i> Evolución de la Deformación Permanente para, a) Una Carga Estática, b)<br>Una Carga Cíclica ..... | 31  |
| <i>Ilustración 6.</i> Flujograma de la Metodología .....                                                                | 36  |
| <i>Ilustración 7.</i> Sección transversal y sección longitudinal del ejemplo vial (CBR 4%).....                         | 145 |
| <i>Ilustración 8.</i> Sección transversal y sección longitudinal del ejemplo vial (CBR 2%).....                         | 147 |

### **Glosario**

**Mezcla asfáltica:** También denominada aglomerado, en general es una combinación de un ligante hidrocarbonato y agregados minerales pétreos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla, así como el rendimiento de esta como mezcla terminada para un determinado uso. *(Yepes V. 2014)*

**GCR:** El cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado es un ligante hidrocarbonado resultante de la mezcla de cemento asfáltico, grano de caucho reciclado (GCR) y, eventualmente, otros aditivos que se requieran para utilizar el ligante en trabajos de pavimentación. El grano de caucho reciclado (GCR) corresponde a partículas de caucho obtenidas del reciclaje de llantas (vulcanizado). *(INVIAS Art 413.2.1. 2012)*

**INVIAS:** El Instituto Nacional de Vías, Invias, tiene como objetivo la ejecución de las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la infraestructura no concesionada de la red vial nacional de carreteras primaria y terciaria, férrea, fluvial y de la infraestructura marítima, de acuerdo con los lineamientos dados por el Ministerio de Transporte. *(INVIAS 2014)*

### **Introducción**

Hoy en día el uso de mezclas asfálticas para carreteras y calles se ha ido intensificando debido a la alta demanda vehicular y el mal estado que presenta la infraestructura vial en la ciudad de Bogotá, lo que hace que se genere más producción y desarrollo de la malla vial urbana, generando mayor huella ecológica y por esto se han implementado tecnologías modernas que sustituirán a los procesos antiguos como la mezcla asfáltica convencional, con el fin de obtener calidad, durabilidad y procesos que sean más ecológicos que le permitan a la ciudad de Bogotá incrementar y mejorar su malla vial, para así satisfacer la necesidades de los ciudadanos.

Es por eso que las diferentes plantas asfálticas que producen la mayor cantidad de asfalto para Bogotá y entidades encargadas del desarrollo de la malla vial de la ciudad, están usando esta tecnología que es moderna y ecológica, conocida como la implementación del GCR en la mezcla asfáltica, la cual consiste en hacer uso de las llantas desechadas de todo tipo, las cuales pasan a ser trituradas para que tengan el tamaño de partículas óptimo y cumplan con los indicadores de calidad estandarizados por el INVIAE los cuales se encuentran en el Capítulo 4 de sus especificaciones - Pavimentos asfálticos (Tabla 413-2 Distribución de tamaños del grano de caucho reciclado GCR). Este tipo de tecnología muestra un mejor manejo, control y uso de este tipo de desechos, lo cual disminuye la huella ecológica, dado que se dispondrán para ser reutilizados y se disminuirá la quema a cielo abierto de estos polímeros que generan grandes cantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Diferentes investigadores aseguran que la implementación de este polímero en la mezcla asfáltica genera una mejoría en sus propiedades mecánicas al momento de



compararlas por medio de briquetas realizadas en laboratorio, en donde la mezcla asfáltica con GCR tenía un mejor desempeño con los requerimientos de la norma que la mezcla convencional (López, 2018). Para verificar si esto se presenta de igual manera en la ciudad de Bogotá se realizarán comparaciones mediante los resultados de los laboratorios practicados a mezclas (convencional y GCR) producidas por las plantas asfálticas.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Comparar y analizar las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas convencionales con las de grano de caucho reciclado (GCR) fabricadas en plantas de producción; analizando los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio realizados por diferentes productores de Bogotá.

### **Objetivos específicos**

1. Hacer un análisis comparativo a partir de ensayos de caracterización física y mecánica entre las mezclas asfálticas producidas en planta con asfaltos convencionales y las fabricadas con asfaltos modificados con GCR.
2. Diseñar la estructura de pavimento de la mezcla asfáltica GCR demostrando que esta es superior a las mezclas convencionales, en cuanto a propiedades mecánicas para vías de alto flujo vehicular.
3. Determinar la relación beneficio – costo que teóricamente se tendría cuando se utiliza cada tipo de mezcla y formular recomendaciones para la utilización de cada una.

### **Justificación**

A raíz del problema ambiental que se ha venido presentando sobre la contaminación que genera el caucho de las llantas en Bogotá y en el mundo, surgieron muchas inquietudes acerca de ¿cómo reutilizar este material?, ya que es necesario obtener un destino aplicable que genere menos contaminación y más uso de este residuo. Se estima que en Colombia se generan por año alrededor de 5'300.000 llantas usadas (Min ambiente, 2016). Para esto se han venido presentando diferentes formas de reciclar este polímero, desde hace unos años la más practicada es producir mezclas asfálticas con grano de caucho (GCR), es una excelente tecnología ya que mitiga problemas ambientales (gases tóxicos contaminantes, sitios potenciales de incubación de mosquitos en épocas de lluvia, llantas propensas a incendios, contaminación visual del ambiente) y menciona que se pueden obtener mejoras considerables en sus propiedades mecánicas, pero este tipo de mezcla tiene un problema y es que eleva los costos entre un 26% y 42% según un estudio realizado por el IDU y la Universidad de Los Andes en el año 2002.

Este proyecto se realiza de manera académica con el fin de cuantificar las mejoras en el desempeño de las mezclas asfálticas GCR fabricadas en Bogotá con respecto a las convencionales. Adicional a esto se quiere evaluar la posibilidad de disminuir espesores en la estructura del pavimento cuando se utilice la mezcla asfáltica con adición de GCR, lo cual generará mayor economía en las obras de desarrollo urbano vial.

## **Marco referencial**

### **Marco teórico**

Las concesiones viales en Colombia están en crecimiento, su desarrollo se remonta por la carencia de infraestructura en las zonas rurales y municipios, en 1930 la movilización por carretera entre municipios y capitales de departamentos pequeños era una acción bastante complicada, por el torpe progreso de las obras y por su gran prolongación en el tiempo donde deja ver problemas de corrupción entre otros, así mismo contingencias propias de la topografía del país, esto hacía que las intersecciones viales fueran bastante complejas. (Maldonado, 2016).

Dadas las problemáticas que se presentaban antiguamente en la malla vial nacional, se buscaron nuevas tecnologías y alternativas, diferentes a la mezcla convencional, con fin de reutilizar materiales dañinos para el ambiente pero que también pudieran mejorar las propiedades físico-mecánicas del asfalto, dado este concepto se empieza a investigar y aplicar una alternativa llamada “asfalto con grano de caucho reciclado”, la cual aparentemente mejora las propiedades del cemento asfáltico.

### **Pavimento**

Los pavimentos son las capas superpuestas que están constituidas por uno o más materiales que son colocados sobre un terreno nivelado y compactados, para aumentar su resistencia y así servir para la circulación de vehículos o personas. Los materiales utilizados en la pavimentación urbana, industrial o vial son materiales rocosos, el hormigón y las mezclas asfálticas.

Actualmente existen muchas investigaciones sobre la utilización de pavimentos que ayudan al medio ambiente. (Díaz & Castro, 2017)

### **Mezcla asfáltica**

Las mezclas asfálticas u aglomerados están formadas por una combinación de agregados pétreos, y un ligante hidrocarbonato, de manera que aquellos queden cubiertos por una película continua. Se fabrican en unas centrales fijas o móviles se transportan después a la obra y allí se extienden y se compactan. (Padilla, 2004)

Las mezclas asfálticas pueden clasificarse por el agregado empleado, por la temperatura y su procedimiento al ser puestas en obra, por el tamaño máximo del agregado que contienen, por la granulometría y por la proporción de vacíos en sí misma.

Es importante tener en cuenta varios aspectos al momento de elegir la mezcla asfáltica más adecuada, como por ejemplo la estructura del pavimento, las técnicas del diseño, el lugar de la obra (localización, topografía, hidrología, clima, demás), elección del tipo de ligante, dosificación del ligante, entre otros.

### **Mezcla asfáltica (Convencional)**

#### **- Asfalto**

El asfalto es un material de particular interés para el ingeniero porque es un aglomerante resistente, muy adhesivo, altamente impermeable y duradero. Es una sustancia plástica que da flexibilidad controlable a las mezclas de áridos con las que se combina usualmente. Además, es altamente resistente a la mayor parte de los ácidos, álcalis y sales. Aunque es una sustancia sólida o semisólida a temperaturas atmosféricas ordinarias, puede

licuarse fácilmente por aplicación de calor, por la acción de disolventes de volatilidad variable o por emulsificación. (Velázquez, 1977)

### **Mezcla asfáltica GCR (Granulo de Caucho Reciclado)**

Es el producto de un proceso de transformación de las llantas recicladas en partículas para diferentes usos, entre ellos, el mejoramiento de las mezclas asfálticas. La implementación del GCR busca que los pavimentos duren más. (IDU, 2012)

#### **- Caucho**

El caucho es una sustancia natural caracterizada por su repelencia al agua, su elasticidad y su resistencia eléctrica. El caucho es encontrado en el líquido lechoso de especies vegetales tropicales, las cuales a su vez son materiales poliméricos.

#### Propiedades:

- El caucho puede obtener una deformación bastante amplia gracias a su naturaleza plástica. Esta cualidad puede ser modificada o alterada por efecto de productos químicos.
- Algunos coagulantes utilizados al momento de preparar el caucho pueden modificar el grado de absorción de agua; pero utilizando ácido clorhídrico, ácido sulfúrico o alumbre se pueden obtener cauchos con un alto nivel de absorción.

#### **- Llantas desechadas**

Las llantas suelen ser contaminantes, generan bastante peligro debido a que son el primer elemento en encender en incendios, atentan contra la salud pública, y demás. En la actualidad se utilizan varios métodos para recuperar materiales que contienen las llantas desechadas, estos son algunos métodos.

- Incineración: Consiste en la combustión de materiales con presencia orgánica, en hornos con materiales refractarios a temperaturas elevadas. Se presentan dificultades con las velocidades de combustión, siendo un proceso difícil de controlar, haciendo que tenga un alto costo y por lo general resulta contaminante.
- Termólisis: Los materiales son sometidos a un calentamiento sin oxígeno, generando así la destrucción de enlaces químicos presentes.
- Trituración criogénica: Este proceso necesita unos establecimientos muy complejos, lo cual lo hace el proceso costoso, debido al mantenimiento de la maquinaria. Sus resultados son de baja calidad y el inconveniente físico y económico genera que este proceso sea poco usado.

*Ilustración 1. Llantas desechadas*



*Fuente (Ministerio de ambiente, 2020)*

- **Proceso por vía húmeda**

El GCR es mezclado con el asfalto, generando una reacción entre estos dos elementos que genera una mezcla modificada “asfalto – caucho”, bajo unas condiciones de temperatura y tiempo de agitación. (IDU, 2009)

*Ilustración 2. Mezcla asfáltica modificada con GCR por vía húmeda*



*Nota: Proceso de grano de caucho reciclado por vía húmeda. Fuente: (Fajardo, E. & Vergaray, D., 2014)*

- **Proceso por vía seca**

El GCR es adicionado directamente a la mezcla asfáltica caliente, por lo tanto, no requiere de un equipo especial. A este proceso se recurre cuando se requiere utilizar el GCR como un agregado en la mezcla. (IDU, 2009)



*Ilustración 3. Mezcla asfáltica modificada con GCR por vía seca*



*Nota: Proceso de grano de caucho reciclado por vía seca. Fuente: Fuente: (Fajardo, E. & Vergaray, D., 2014)*

## Ensayos

En Colombia el diseño de las mezclas asfálticas se debe realizar por el método Marshall según la norma de ensayo INV E-748-07. Adicionalmente cuando la mezcla va a ser colocada en vías con tránsitos elevados se requieren ciertos ensayos para verificar su comportamiento, como se solicita en las actuales especificaciones de construcción IDU:

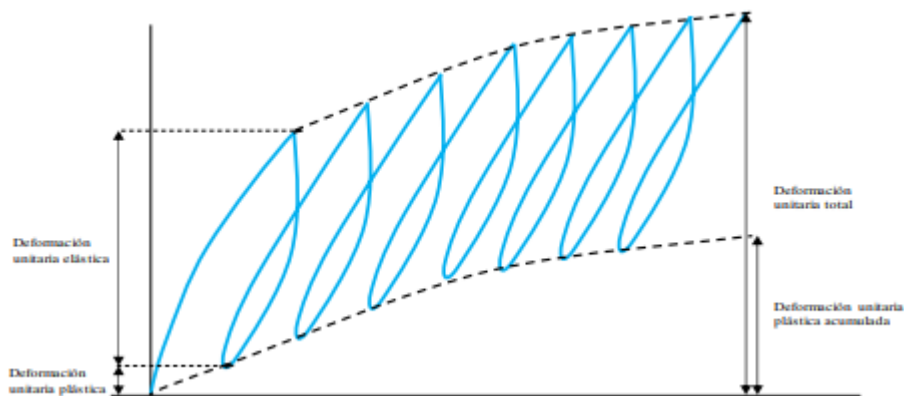
## Módulo resiliente

Es común que la mayoría de los materiales del pavimento no tengan buena elasticidad, por lo cual pueden presentar deformaciones permanentes después de cada carga. Pero si la carga es pequeña en comparación a la resistencia del material y se aplica con un número grandes de repeticiones, la deformación que presenta es posiblemente recuperable, y puede ser considerada elástica. (Ramírez, 2008)

Por esto, el módulo resiliente es considerado como uno de los parámetros más relevantes en cuanto a los materiales. Debido al estado de trabajo de cada una de las capas expuestas a la acción del tráfico, las cuales son cargas dinámicas cíclicas. (Xiao, 2009).

Se tiene dos tipos de deformaciones, elásticas e inelásticas, las cuales son afectadas por las repeticiones de carga acumuladas, las características dependientes del clima, el diseño estructural del pavimento, el comportamiento esfuerzo-deformación entre otras. Las deformaciones elásticas o también llamadas resilientes son aquellas de recuperación instantánea, o retardada, en donde se libera aproximadamente un 80% de la deformación recuperable instantáneamente y el 20% sobrante en forma retardada. Y las deformaciones inelásticas o plásticas son aquellas que continúan en el pavimento después de la deformación. En la ilustración 4, se observa la curva típica para la determinación del módulo resiliente, en donde la deformación plástica se vuelve acumulativa y puede alcanzar valores inadmisibles para la mezcla asfáltica. (Berrío, 2017)

*Ilustración 4. Módulo Resiliente*



*Nota: Curva típica para la determinación del Módulo Resiliente Fuente: (Berrío, 2017)*

El módulo resiliente de tensión está basado en la deformación recuperable bajo la acción repetida de cargas; se determina de la siguiente manera:

$$MR = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo aplicado y  $\varepsilon$  la deformación recuperable medida. Se debe simular lo que verdaderamente sucede en el campo, teniendo en cuenta el tipo y duración de las cargas usadas en la prueba de esfuerzo repetido. El esfuerzo en un punto es cero cuando la carga de la rueda está a una distancia considerable de un punto dado en el pavimento, y la tensión es máxima cuando la carga está directamente sobre el punto dado. (Ramírez, 2008)

Para valorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en el diseño de pavimentos obteniéndose el valor del módulo resiliente, es necesario emplear el ensayo de tensión indirecta, para calificar tanto la calidad relativa de los materiales, como obtener los datos de entrada del diseño, la evaluación y el análisis de pavimentos. También se utiliza para analizar los efectos de la temperatura, tasa de carga y periodos de reposo, entre otros. (Ramírez, 2008)

Para realizar el ensayo del módulo resiliente, las probetas deberán ser elaboradas con una mezcla sometida a envejecimiento previo, según la norma AASHTO R30, en donde el valor del mudo debe estar a veinte grados Celsius (20° C), con un mínimo de diez mil mega pascuales (10,000 Mpa), para ser compactadas con 75 golpes por cada cara, con una frecuencia de 10 Hz. El módulo podrá ser medido mediante alguno de los ensayos definidos en la norma EN-12697-26, y para

tránsitos T4 y T5 se deberá medir y reportar los módulos resilientes correspondientes a la mezcla definida como óptima al efectuar el diseño Marshall para todas las mezclas empleadas. (IDU sección 510-11)

### **Comprobación de la adhesividad**

Es importante comprobar la adhesividad entre el agregado pétreo y el ligante asfáltico, por medio de la norma de ensayo INV E-725-07 ensayo de tracción indirecta para obtener el contenido óptimo de ligante para verificar la sensibilidad que tiene al agua. La resistencia promedio a tracción indirecta de las probetas sometidas a curado húmedo deberá ser, por lo menos, ochenta por ciento del valor promedio alcanzado por las probetas curadas en condición seca. Si no se alcanza este valor, se deberá incrementar la adhesividad empleando un aditivo mejorador de adherencia apropiado. (IDU sección 510-11)

Al realizar el ensayo de tracción indirecta, también se puede obtener el porcentaje de adhesividad o “Relación de resistencias a la tensión”, primero se debe calcular la resistencia a la tensión de cada probeta, para esto se necesitan los siguientes datos: carga máxima en la cual la probeta fallo, altura y el diámetro del espécimen.

$$R_T = \frac{2000 * P}{\pi * t * D}$$

t = Altura del espécimen en mm

D = Diámetro del espécimen en mm

P = Carga máxima en Newton

Con este valor calculado para cada una de las probetas, tanto para el grupo de probetas sometidas a curado húmedo y el grupo de probetas en seco, se procede a calcular el porcentaje de adhesividad de la siguiente forma:

$$RR_T = \left[ \frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] * 100$$

$R_{TH}$  = Promedio de la resistencia a la tensión del grupo sometido a curado húmedo.

$R_{TS}$  = Promedio de la resistencia a la tensión del grupo en seco. (Aguilera & Ramírez, 2016).

### **Resistencia a la deformación plástica**

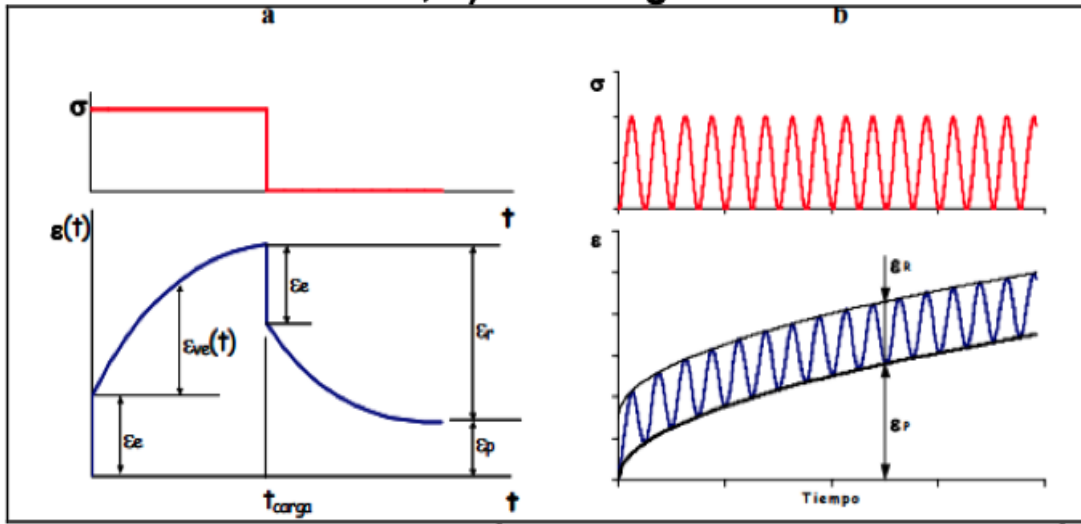
Las mezclas definidas óptimas para efectuar el diseño Marshall deberán ser verificadas con la medida de su resistencia a la deformación plástica mediante ensayos de laboratorio según la norma INV E-756-07. La velocidad de deformación entre ciento cinco y ciento veinte minutos no podrá exceder los 15 µm/minuto para mezclas que se vayan a emplear en pavimento de tránsito T5, o exceder los 20 µm/minuto para mezclas que vayan a servir tránsitos T4. Si este requisito no se cumple, se deberán efectuar los ajustes necesarios en el diseño de la mezcla. (IDU sección 510-11)

El ensayo de pista de laboratorio consiste en someter una probeta prismática de mezcla asfáltica, al paso alternativo de una rueda, en condiciones determinadas de

presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Las probetas, de  $30 \times 30 \times 5$  cm, se compactan por vibración. El ensayo se realiza a una temperatura constante de  $60^{\circ}$  C, haciendo pasar una rueda metálica, de 20 cm de diámetro, dotada de una banda de rodadura de caucho macizo de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 kN/m<sup>2</sup>. La frecuencia del movimiento de vaivén es de 42 pasadas por minuto, con un recorrido en cada sentido de 23 cm. Durante el ensayo, se determinan las deformaciones totales de la probeta en los minutos 1, 3 y 5 y a continuación cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo.

Las mezclas asfálticas son “materiales visco elásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. Desde el punto de vista estructural, las propiedades mecánicas más similares son el módulo de deformación, la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones permanentes”. (Cabrera & Rodríguez, 2016).

*Ilustración 5. Evolución de la Deformación Permanente para, a) Una Carga Estática, b) Una Carga Cíclica*



Fuente: (Cabrera y Rodríguez, 2016)

### Módulo Dinámico

Las mezclas definidas óptimas para efectuar el diseño Marshall deberán ser verificadas con la medida de su módulo dinámico de acuerdo con las hipótesis de diseño y los criterios de fatiga empleados. Para esto se elaborarán tres probetas por cada quinientos metros cúbicos (500 m<sup>3</sup>) de mezcla asfáltica en caliente colocada, para verificar en el laboratorio la medida de su módulo dinámico, según la norma INV E-754-07. El módulo promedio de las tres probetas no podrá exceder en más del quince por ciento (15%) el valor considerado en la hipótesis de diseño, ni encontrarse por debajo en más del cinco por ciento (5%) de este valor. (IDU sección 510-11)

Los valores del módulo dinámico pueden emplearse tanto para el diseño de la mezcla asfáltica para pavimento, como para el diseño del espesor de la capa de pavimento asfáltico.

El método de ensayo que permite su determinación (ASTM D3496 y D3497, AASTHO TP62) cubre procedimientos para preparar y ensayar mezclas asfálticas como para determinar los valores del módulo dinámico. Este ensayo puede ser con carga uniaxial o triaxial de compresión o tensión.

El procedimiento cubre un amplio intervalo tanto de temperatura como de frecuencia de carga. La serie de ensayos mínima recomendada incluye temperaturas de 5, 25 y 40°C (42, 77 y 104°F) y frecuencias de cargas de 1, 4 y 16Hz para cada temperatura. (Leiva, 2004)

### **Fatiga**

La fatiga es un cambio estructural permanente y progresivo que ocurre en las mezclas asfálticas en un punto del material expuesto a esfuerzos y deformaciones de amplitudes variables, obteniendo la aparición de fisuras que se convierten en una fractura total del material, causado por un número determinado de repeticiones.

El estudio de la fatiga contempla la rotura producida bajo cargas en el período elástico del comportamiento del material, se produce una pérdida de resistencia en función del número de ciclos que excede la resistencia máxima, provocando un problema de plasticidad y daños secundarios. (Vera, 2012)

La relación entre la deformación y la duración o vida de fatiga del material representada por el número N de veces que soporta la sollicitación antes de romperse por fatiga y N están ligadas por la siguiente ecuación:

$$N = k1 * \varepsilon^{k2}$$



$N$ : Número de ciclos de carga hasta la fatiga del material al nivel de deformación

$\epsilon$ : Deformación unitaria de tracción (en micro deformaciones en m/m)

$k_1$  y  $k_2$ : Constantes que describen el comportamiento a fatiga del material

Numerosos estudios se han realizado para establecer qué parámetros de la mezcla intervienen de manera significativa en la determinación de los valores de  $k_1$  y  $k_2$ . Se ha comprobado que están principalmente afectados por: El módulo de la mezcla, el contenido de asfalto, la viscosidad del asfalto, la granulometría y la naturaleza de los áridos, el contenido de aire y la temperatura del pavimento. (Alfaro, 2016)

Para la verificación del cumplimiento de fatiga en la mezcla asfáltica se tienen dos partes, la primera corresponde a la aprobación de la mezcla según las hipótesis del diseño, y la segunda corresponde al control de calidad para la aprobación de esta. Los ensayos de fatiga se realizan bajo condiciones de densidad, temperatura y frecuencia representativas de las condiciones reales de operación del pavimento. Las probetas que se sometan a este ensayo deberán ser elaboradas con una mezcla sometida a envejecimiento previo según la norma de ensayo AASHTO R-30. (IDU sección 510-11)

### **Marco normativo**

- a) Resolución 6981 – diciembre 27 de 2011. Entre Secretaría de Ambiente y Secretaría de Movilidad. “Por la cual se dictan lineamientos para el aprovechamiento de llantas y neumáticos usados, y llantas no conforme en el Distrito Capital”.

- b) Resolución 1457 – Julio 29 de 2010. Entre Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. “Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas y se adoptan otras disposiciones”.
- c) Resolución 2397 – abril 25 de 2011. Secretario Distrital de Ambiente. “Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital”.
- d) Resolución 1115 – septiembre 26 de 1012. La Secretaría Distrital de Ambiente. “Por medio de la cual se adoptan los lineamientos Técnico – Ambientales para las actividades de aprovechamiento y tratamiento de los residuos de construcción y demolición en el Distrito Capital”.
- e) Decreto Número 586 – diciembre 29 de 2015. El Alcalde Mayor de Bogotá, D.C. “Por medio del cual se adopta el modelo eficiente y sostenible de gestión de los Residuos de Construcción y Demolición – RCD en Bogotá D.C”.
- f) Especificaciones IDU-ET-2011 – Sección 510-11. Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas, y de alto módulo.
- g) Especificaciones INVIAAS 2012 – Artículo 413-2013. Mezcla modificada con granulo de caucho.

### **Metodología**

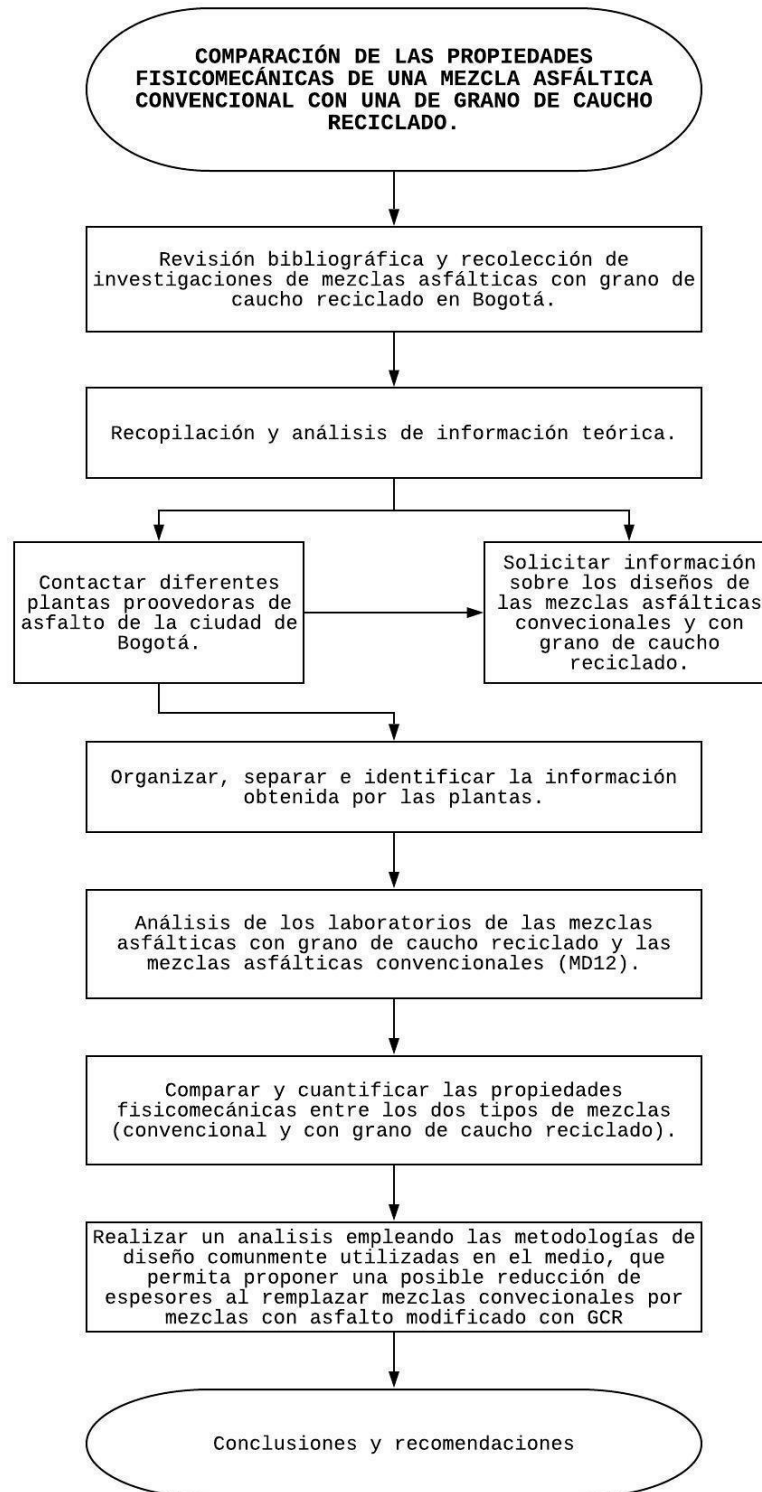
Para la realización de este proyecto se basará en información de laboratorios que será suministrada por plantas productoras de asfalto que producen y proveen este tipo de mezclas (GCR y Convencional) para el desarrollo y mantenimiento de las obras viales y/o por contratos públicos que contengan esta información y sirvan para el desarrollo óptimo del proyecto.

Con la información suministrada por parte de las plantas y la investigada, se analizará de forma comparativa los resultados de los laboratorios de las mezclas fabricadas recientemente para satisfacer la demanda de las obras viales en la ciudad. De esta manera se podrá verificar si la mezcla GCR presenta mejoras en sus propiedades en comparación con las propiedades de la mezcla convencional y cuantificarlas, determinando parámetros seguros para diseño.

A partir de dichos parámetros se realizará un análisis empleando las metodologías de diseño comúnmente utilizadas en el medio, que permita proponer una posible reducción de espesores al reemplazar mezclas convencionales por mezclas con asfalto modificado con GCR.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos y el análisis de bibliografía relacionada con la reducción de espesores de carpetas que se hace en otros países al utilizar mezclas con GCR se establecerán las conclusiones del trabajo y las recomendaciones para que la reducción de espesores propuesta pueda ser verificada, ajustada e implementada en Bogotá y en un futuro a nivel nacional.

Ilustración 6. Flujograma de la Metodología



### **Recolección de datos**

Con los datos obtenidos de las diferentes fuentes, se elabora la siguiente base de datos completando la información necesaria, clasificándola por contrato o planta, por tipo de mezcla (MD20, MD19 y GCR) y a su vez por los diferentes laboratorios (fatiga, módulo, adherencia y ahuellamiento) que se les realizaron a las mezclas asfálticas, acompañado de este se despliega la normativa que se utilizó en el ensayo y el resultado obtenido.

Una parte de la información contenida en la base de datos fue obtenida por una búsqueda generada por el repositorio del **Instituto de Desarrollo Urbano (IDU)** en donde se hallaron diferentes contratos. Y la otra parte es información suministrada por dos plantas productoras de mezcla asfáltica, la cual permitió trabajar con los resultados de laboratorio con fin académico, pero sin revelar el nombre de la empresa. Para esto se citan como “Planta 1” y “Planta 2” a estas empresas.

- Planta 1
- Planta 2
- IDU-1397-17
- IDU-1119-16
- IDU-1662-14
- Convenio la felicidad.

#### **Planta 1**

La información suministrada, está relacionada con el sistema de gestión de calidad, procesos de la planta y el laboratorio, control de calidad a las materias primas y al producto

terminado, los ensayos y análisis de resultados obtenidos del proceso de formulación por el método Marshall.

### Mezcla asfáltica GCR

Mezcla asfáltica en caliente con asfalto modificado con caucho por vía húmeda con laboratorios de adherencia, ahuellamiento, fatiga y modulo. Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 1. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

|               | TIPO DE AGREGADO       | ORÍGEN                  | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| GRANULOMETRÍA | Agregado pétreo fino   | Crudo del río Coello    | IDU-ET-510-11  |
|               | Agregado pétreo grueso | Crudo del río Guayuriba | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente:Privada.

Tabla 2. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

|                 | ENSAYO                                     | NORMA          | RESULTADO | PARÁMETRO   |
|-----------------|--------------------------------------------|----------------|-----------|-------------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706-13 | 47        | 40-70       |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712-13 | 67        | ≥ 52        |
|                 | Viscosidad Brookfield a 163°C, (cP/Pa-s)   | I.N.V.E-717-13 | 1965      | 1500 - 3000 |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada.

Tabla 3. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

|                                | ENSAYO                                            | NORMA                            | RESULTADO  | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|------------|---------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON GCR (%) | I.N.V.E-748/732-13               | 6,4        | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                        | I.N.V.E-748-13                   | 75         | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                         | I.N.V.E-748-13                   | 1391/13646 | ≥900Kg/≥9000N |
|                                | Flujo (mm)                                        | I.N.V.E-748-13                   | 3,6        | >2,0mm        |
|                                | Vacios con aire Va, (%)                           | Rodadura Intermedia Base         |            | 3,0 a 5,0%    |
|                                |                                                   | I.N.V.E-736/799-13 Manual MS-2   | 4,0        | 3,0 a 5,0%    |
|                                | Vacios en los agregados minerales VAM, (%)        | Mezclas 20 Mezclas 12 Mezclas 10 |            | -             |
|                                |                                                   | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2       | 15,2       | -             |
|                                | Vacios llenos de asfalto VFA, (%)                 | I.N.V.E-799-13                   | 74         | -             |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada.

### Fatiga GCR

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 4. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 1

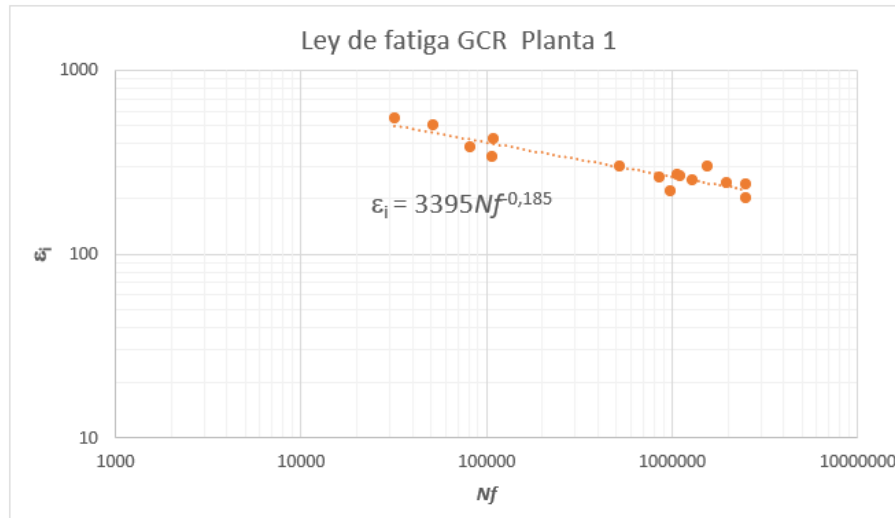
| <b>FATIGA GCR PLANTA 1</b>                             |                                       |           |                                    |              |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|------------------------------------|--------------|
| <b><math>\varepsilon</math> ( <math>\mu</math>def)</b> | <b><math>\varepsilon</math> (def)</b> | <b>Nf</b> | <b>Ln <math>\varepsilon</math></b> | <b>Ln Nf</b> |
| 340                                                    | 0,000340                              | 108095    | 2,53148                            | 5,03381      |
| 250                                                    | 0,000250                              | 1298100   | 2,39794                            | 6,11331      |
| 270                                                    | 0,000270                              | 1064562   | 2,43136                            | 6,02717      |
| 380                                                    | 0,000380                              | 82230     | 2,57978                            | 4,91503      |
| 300                                                    | 0,000300                              | 1554330   | 2,47712                            | 6,19154      |
| 200                                                    | 0,000200                              | 2500000   | 2,30103                            | 6,39794      |
| 240                                                    | 0,000240                              | 2500000   | 2,38021                            | 6,39794      |
| 420                                                    | 0,000420                              | 108989    | 2,62325                            | 5,03738      |
| 500                                                    | 0,000500                              | 51583     | 2,69897                            | 4,71251      |
| 550                                                    | 0,000550                              | 31995     | 2,74036                            | 4,50508      |
| 300                                                    | 0,000300                              | 526630    | 2,47712                            | 5,72151      |
| 260                                                    | 0,000260                              | 855167    | 2,41497                            | 5,93205      |
| 265                                                    | 0,000265                              | 1114800   | 2,42325                            | 6,04720      |
| 245                                                    | 0,000245                              | 1988414   | 2,38917                            | 6,29851      |
| 220                                                    | 0,000220                              | 986472    | 2,34242                            | 5,99408      |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **265** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 3395Nf^{-0.185}$$

Gráfico 1. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 1



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

## Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 5. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

| ADHERENCIA GCR PLANTA 1                                  |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 2             | 65,7        | 101,6         | 1061             | 1011,9                         | 146,7585207                    |
|                                                          | 4             | 65,7        | 101,6         | 1032             | 984,2                          | 140                            |
|                                                          | 5             | 65,7        | 101,6         | 996              | 935,7                          | 133,1                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 977,3                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 140,0                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 1             | 65,2        | 101,6         | 1032             | 991,8                          | 144                            |
|                                                          | 3             | 66,5        | 101,6         | 989              | 931,9                          | 140                            |
|                                                          | 6             | 65,8        | 101,6         | 925              | 880,9                          | 133,1                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 934,9                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 139,0                          |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua, y en seco. Fuente: Privada.



Tabla 6. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

|                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RELACIÓN DE<br/>RESISTENCIA A LA<br/>TENSIÓN (%) GCR</b> | <b>96%</b> |
|-------------------------------------------------------------|------------|

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Propia

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)

Tabla 7. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA GCR PLANTA 1 |                  |                  |                 |              |                  |                  |                 |              |                  |                  |                 |                   |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| PROBETA 1                         |                  |                  |                 | PROBETA 2    |                  |                  |                 | PROBETA 3    |                  |                  |                 | PROMEDIO DEF (μm) |
| Tiempo (min)                      | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) |                   |
| 0                                 | 0,026            | 26               | 0,000           | 0            | 0,072            | 72               | 0,000           | 0            | 0,091            | 91               | 0,000           | 63                |
| 1                                 | 0,095            | 95               | 0,069           | 1            | 0,276            | 276              | 0,204           | 1            | 0,331            | 331              | 0,240           | 234               |
| 3                                 | 0,119            | 119              | 0,024           | 3            | 0,329            | 329              | 0,053           | 3            | 0,413            | 413              | 0,082           | 287               |
| 5                                 | 0,190            | 190              | 0,071           | 5            | 0,358            | 358              | 0,029           | 5            | 0,524            | 524              | 0,111           | 357               |
| 10                                | 0,297            | 297              | 0,107           | 10           | 0,462            | 462              | 0,104           | 10           | 0,601            | 601              | 0,077           | 453               |
| 15                                | 0,360            | 360              | 0,063           | 15           | 0,554            | 554              | 0,092           | 15           | 0,700            | 700              | 0,099           | 538               |
| 20                                | 0,411            | 411              | 0,051           | 20           | 0,620            | 620              | 0,066           | 20           | 0,761            | 761              | 0,061           | 597               |
| 25                                | 0,460            | 460              | 0,049           | 25           | 0,683            | 683              | 0,063           | 25           | 0,822            | 822              | 0,061           | 655               |
| 30                                | 0,514            | 514              | 0,054           | 30           | 0,751            | 751              | 0,068           | 30           | 0,851            | 851              | 0,029           | 705               |
| 35                                | 0,569            | 569              | 0,055           | 35           | 0,802            | 802              | 0,051           | 35           | 0,890            | 890              | 0,039           | 754               |
| 40                                | 0,616            | 616              | 0,047           | 40           | 0,859            | 859              | 0,057           | 40           | 0,957            | 957              | 0,067           | 811               |
| 45                                | 0,657            | 657              | 0,041           | 45           | 0,912            | 912              | 0,053           | 45           | 0,968            | 968              | 0,011           | 846               |
| 60                                | 0,769            | 769              | 0,112           | 60           | 1,035            | 1035             | 0,123           | 60           | 1,039            | 1039             | 0,071           | 948               |
| 75                                | 0,851            | 851              | 0,082           | 75           | 1,088            | 1088             | 0,053           | 75           | 1,162            | 1162             | 0,123           | 1034              |
| 90                                | 0,935            | 935              | 0,084           | 90           | 1,135            | 1135             | 0,047           | 90           | 1,270            | 1270             | 0,108           | 1113              |
| 105                               | 1,002            | 1002             | 0,067           | 105          | 1,164            | 1164             | 0,029           | 105          | 1,375            | 1375             | 0,105           | 1180              |
| 120                               | 1,068            | 1068             | 0,066           | 120          | 1,205            | 1205             | 0,041           | 120          | 1,477            | 1477             | 0,102           | 1250              |

| PROBETA 1 |                  |                    |                    | PROBETA 2 |                  |                    |                    | PROBETA 3 |                  |                    |                    | PROMEDIO PROBETAS  |
|-----------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (μm/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (μm/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (μm/min) | Velocidad (μm/min) |
| 30 - 45   | 0,143            | 0,0095             | 9,5                | 30 - 45   | 0,161            | 0,0107             | 10,7               | 30 - 45   | 0,117            | 0,0078             | 7,8                | 9,4                |
| 75 - 90   | 0,084            | 0,0056             | 5,6                | 75 - 90   | 0,047            | 0,0031             | 3,1                | 75 - 90   | 0,108            | 0,0072             | 7,2                | 5,3                |
| 105 - 120 | 0,066            | 0,0044             | 4,4                | 105 - 120 | 0,041            | 0,0027             | 2,7                | 105 - 120 | 0,102            | 0,0068             | 6,8                | 4,6                |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup>. Fuente: Privada

Tabla 8. Velocidad en μm/min obtenida según especificación. Planta 1

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (μm/min) | Velocidad (μm/min)       |
| 4,6                | 15,0                     |

## Módulos

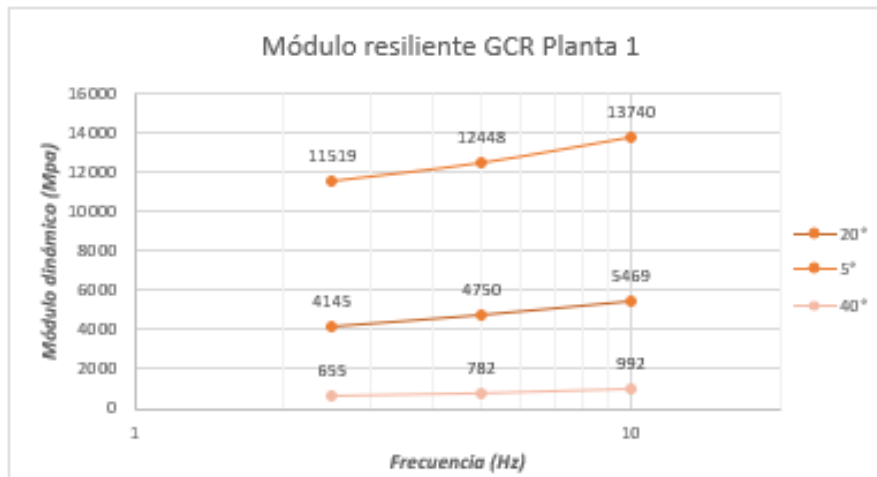
Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

Tabla 9. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica GCR. Planta 1

| <b>MODULO RESILIENTE GCR PLANTA 1</b> |                         |                              |
|---------------------------------------|-------------------------|------------------------------|
| <b>Temp. (°C)</b>                     | <b>Frecuencia (Hz)</b>  | <b>Módulo Dinámico (Mpa)</b> |
| 5°                                    | 10                      | 13740                        |
|                                       | 5                       | 12448                        |
|                                       | 2,5                     | 11519                        |
| 20°                                   | 10                      | 5469                         |
|                                       | 5                       | 4750                         |
|                                       | 2,5                     | 4145                         |
| 40°                                   | 10                      | 992                          |
|                                       | 5                       | 782                          |
|                                       | 2,5                     | 655                          |
| <b>Frecuencia (Hz)</b>                | <b>Temperatura (°C)</b> | <b>Módulo Dinámico (Mpa)</b> |
| 2,5 Hz                                | 5                       | 11519                        |
|                                       | 20                      | 4145                         |
|                                       | 40                      | 655                          |
| 5 Hz                                  | 5                       | 12448                        |
|                                       | 20                      | 4750                         |
|                                       | 40                      | 782                          |
| 10 Hz                                 | 5                       | 13740                        |
|                                       | 20                      | 5469                         |
|                                       | 40                      | 992                          |

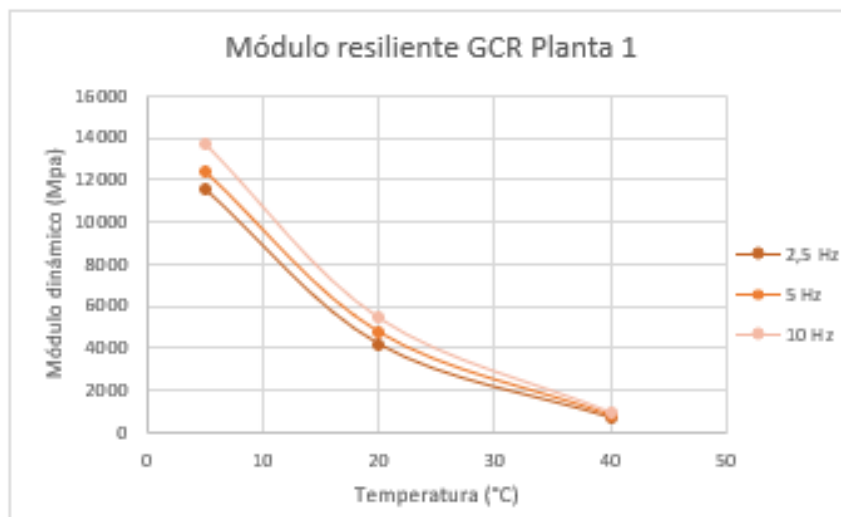
Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada

Gráfico 2. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.

Gráfico 3. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

### Mezcla asfáltica MD12

Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo con laboratorios de adherencia, ahuellamiento, fatiga y módulo, para cada una de las mezclas.

Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 10. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD12. Planta 1

|               | TIPO DE AGREGADO     | ORÍGEN                              | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| GRANULOMETRÍA | Arena triturada fina | Río Guayuriba - Formación Guadalupe | IDU-ET-510-11  |
|               | Arena triturada      | Río Guayuriba                       | IDU-ET-510-11  |
|               | Grava de 1/2" y 3/4" | Río Guayuriba                       | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente: Privada

Tabla 11. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1

|                 | ENSAYO                                     | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706              | 69        | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712              | 49        | 45 - 55 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa - s)         | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 294       | 150-300    |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada.

Tabla 12. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1

|                                | ENSAYO                                     | NORMA              | RESULTADO | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|-----------|---------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13 | 5,5       | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13     | 75        | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13     | 1460      | ≥900Kg/≥9000N |
|                                | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13     | 3,1       | 2,0 a 3,5mm   |
|                                | Vacíos con aire Va, (%)                    | Rodadura           | 4,8       | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Intermedia         |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Base               |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%) | Mezclas 20         | 15,6      | ≥14           |
|                                |                                            | Mezclas 12         |           | ≥15           |
|                                |                                            | Mezclas 10         |           | ≥16           |
|                                | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13     | 69        | 65 a 75%      |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada.

## Fatiga

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas con deformación constante bajo la norma UNE-EN 129697-24:

ANEXO D.

Tabla 13. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 1

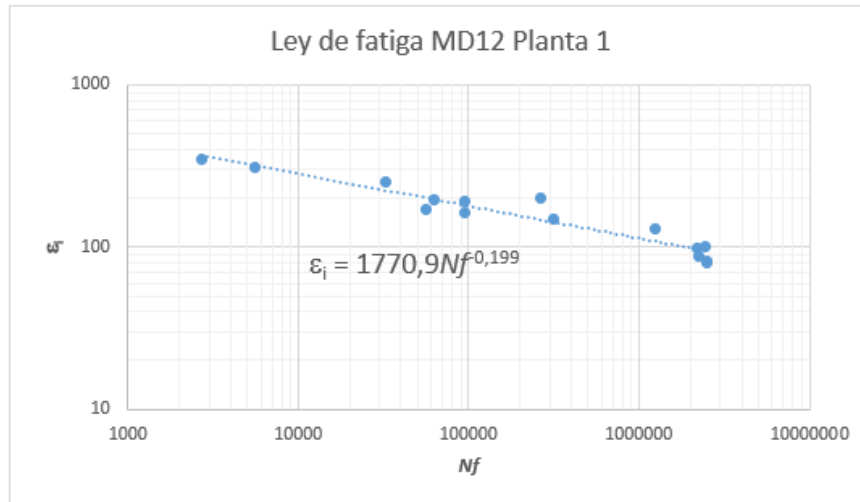
| <b>FATIGA MD12 PLANTA 1</b>                            |                                       |                        |                          |                           |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b><math>\varepsilon</math> (<math>\mu def</math>)</b> | <b><math>\varepsilon</math> (def)</b> | <b><math>Nf</math></b> | <b><math>Ln e</math></b> | <b><math>Ln Nf</math></b> |
| 200                                                    | 0,000200                              | 264196                 | 2,30103                  | 5,42193                   |
| 350                                                    | 0,000350                              | 2696                   | 2,54407                  | 3,43072                   |
| 250                                                    | 0,000250                              | 32355                  | 2,39794                  | 4,50994                   |
| 163                                                    | 0,000163                              | 94002                  | 2,21219                  | 4,97314                   |
| 150                                                    | 0,000150                              | 315900                 | 2,17609                  | 5,49955                   |
| 100                                                    | 0,000100                              | 2446406                | 2,00000                  | 6,38853                   |
| 80                                                     | 0,000080                              | 2500000                | 1,90309                  | 6,39794                   |
| 130                                                    | 0,000130                              | 1236530                | 2,11394                  | 6,09220                   |
| 195                                                    | 0,000195                              | 62434                  | 2,29003                  | 4,79542                   |
| 310                                                    | 0,000310                              | 5532                   | 2,49136                  | 3,74288                   |
| 190                                                    | 0,000190                              | 95041                  | 2,27875                  | 4,97791                   |
| 82                                                     | 0,000082                              | 2500000                | 1,91381                  | 6,39794                   |
| 88                                                     | 0,000088                              | 2219386                | 1,94448                  | 6,34623                   |
| 99                                                     | 0,000099                              | 2181642                | 1,99564                  | 6,33878                   |
| 170                                                    | 0,000170                              | 55620                  | 2,23045                  | 4,74523                   |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos con deformación constante. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **113** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1770,9Nf^{-0.199}$$

Gráfico 4. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 1



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

## Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 14. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12. Planta1

| ADHERENCIA MD12 PLANTA 1                                 |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 66,1        | 101,6         | 965              | 914,8                          | 130,1                          |
|                                                          | 5             | 64,8        | 101,6         | 1066             | 1030,8                         | 146,6                          |
|                                                          | 6             | 65,6        | 101,6         | 1092             | 1043,1                         | 148,4                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 996,2                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 141,7                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 2             | 64,9        | 101,6         | 966              | 932,7                          | 132,7                          |
|                                                          | 3             | 66          | 101,6         | 928              | 881                            | 125,3                          |
|                                                          | 4             | 65,7        | 101,6         | 906              | 864,1                          | 122,9                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 892,6                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 127,0                          |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua y en seco. Fuente: Privada.

Tabla 15. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12. Planta1

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RELACIÓN DE<br/>RESISTENCIA A LA<br/>TENSIÓN (%) MD12</b> | <b>90%</b> |
|--------------------------------------------------------------|------------|

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Privada.

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)

Tabla 16. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1

| DEFORMACIÓN PLASTICA MD12 PLANTA 1 |                     |                     |                    |                 |                     |                     |                    |                 |                     |                     |                    |                      |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| PROBETA 1                          |                     |                     |                    | PROBETA 2       |                     |                     |                    | PROBETA 3       |                     |                     |                    | PROMEDIO<br>DEF (µm) |
| Tiempo<br>(min)                    | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) | Tiempo<br>(min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) | Tiempo<br>(min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) |                      |
| 0                                  | 0,031               | 31                  | 0,000              | 0               | 0,070               | 70                  | 0,000              | 0               | 0,051               | 51                  | 0,000              | 51                   |
| 1                                  | 0,227               | 227                 | 0,196              | 1               | 0,307               | 307                 | 0,237              | 1               | 0,426               | 426                 | 0,375              | 320                  |
| 3                                  | 0,383               | 383                 | 0,156              | 3               | 0,456               | 456                 | 0,149              | 3               | 0,587               | 587                 | 0,161              | 475                  |
| 5                                  | 0,481               | 481                 | 0,098              | 5               | 0,544               | 544                 | 0,088              | 5               | 0,636               | 636                 | 0,049              | 554                  |
| 10                                 | 0,585               | 585                 | 0,104              | 10              | 0,663               | 663                 | 0,119              | 10              | 0,741               | 741                 | 0,105              | 663                  |
| 15                                 | 0,665               | 665                 | 0,080              | 15              | 0,743               | 743                 | 0,080              | 15              | 0,810               | 810                 | 0,069              | 739                  |
| 20                                 | 0,712               | 712                 | 0,047              | 20              | 0,794               | 794                 | 0,051              | 20              | 0,859               | 859                 | 0,049              | 788                  |
| 25                                 | 0,765               | 765                 | 0,053              | 25              | 0,839               | 839                 | 0,045              | 25              | 0,904               | 904                 | 0,045              | 836                  |
| 30                                 | 0,796               | 796                 | 0,031              | 30              | 0,874               | 874                 | 0,035              | 30              | 0,927               | 927                 | 0,023              | 866                  |
| 35                                 | 0,831               | 831                 | 0,035              | 35              | 0,884               | 884                 | 0,010              | 35              | 0,962               | 962                 | 0,035              | 892                  |
| 40                                 | 0,855               | 855                 | 0,024              | 40              | 0,923               | 923                 | 0,039              | 40              | 0,978               | 978                 | 0,016              | 919                  |
| 45                                 | 0,869               | 869                 | 0,014              | 45              | 0,939               | 939                 | 0,016              | 45              | 0,998               | 998                 | 0,020              | 935                  |
| 60                                 | 0,933               | 933                 | 0,064              | 60              | 0,944               | 944                 | 0,005              | 60              | 1,056               | 1056                | 0,058              | 978                  |
| 75                                 | 0,984               | 984                 | 0,051              | 75              | 1,045               | 1045                | 0,101              | 75              | 1,101               | 1101                | 0,045              | 1043                 |
| 90                                 | 1,031               | 1031                | 0,047              | 90              | 1,093               | 1093                | 0,048              | 90              | 1,144               | 1144                | 0,043              | 1089                 |
| 105                                | 1,076               | 1076                | 0,045              | 105             | 1,115               | 1115                | 0,022              | 105             | 1,174               | 1174                | 0,030              | 1122                 |
| 120                                | 1,097               | 1097                | 0,021              | 120             | 1,144               | 1144                | 0,029              | 120             | 1,213               | 1213                | 0,039              | 1151                 |

| PROBETA 1 |                     |                       |                       | PROBETA 2 |                     |                       |                       | PROBETA 3 |                     |                       |                       | PROMEDIO<br>PROBETAS<br>Velocidad<br>(µm/min) |
|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) | PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) | PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) |                                               |
| 30 - 45   | 0,073               | 0,0049                | 4,9                   | 30 - 45   | 0,065               | 0,0043                | 4,3                   | 30 - 45   | 0,071               | 0,0047                | 4,7                   | 4,6                                           |
| 75 - 90   | 0,047               | 0,0031                | 3,133333333           | 75 - 90   | 0,048               | 0,0032                | 3,2                   | 75 - 90   | 0,043               | 0,0029                | 2,9                   | 3,1                                           |
| 105 - 120 | 0,021               | 0,0014                | 1,4                   | 105 - 120 | 0,029               | 0,0019                | 1,9                   | 105 - 120 | 0,039               | 0,0026                | 2,6                   | 2,0                                           |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup>. Fuente: Privada

Tabla 17 Velocidad en µm/min obtenida según especificación. Planta 1

| PROMEDIO<br>PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN<br>MENOR QUE |
|-----------------------|-----------------------------|
| Velocidad<br>(µm/min) | Velocidad<br>(µm/min)       |
| 2,0                   | 15,0                        |

## Módulos

Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

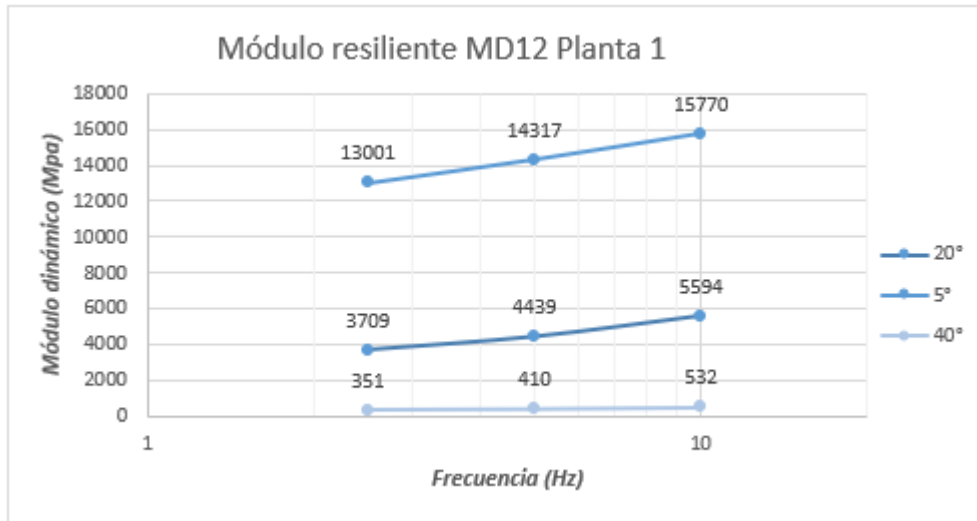
Tabla 18. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD12. Planta 1

| MODULO RESILIENTE MD12 PLANTA 1 |                  |                       |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                      | Frecuencia (Hz)  | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                              | 10               | 15770                 |
|                                 | 5                | 14317                 |
|                                 | 2,5              | 13001                 |
| 20°                             | 10               | 5594                  |
|                                 | 5                | 4439                  |
|                                 | 2,5              | 3709                  |
| 40°                             | 10               | 532                   |
|                                 | 5                | 410                   |
|                                 | 2,5              | 351                   |
| Frecuencia (Hz)                 | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 2,5 Hz                          | 5                | 13001                 |
|                                 | 20               | 3709                  |
|                                 | 40               | 351                   |
| 5 Hz                            | 5                | 14317                 |
|                                 | 20               | 4439                  |
|                                 | 40               | 410                   |
| 10 Hz                           | 5                | 15770                 |
|                                 | 20               | 5594                  |
|                                 | 40               | 532                   |

Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada.

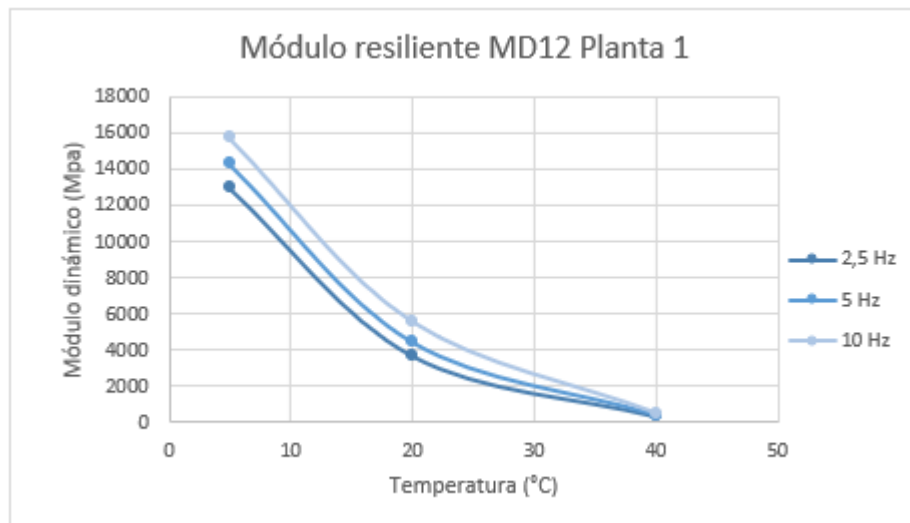


Gráfico 5. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD12. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.

Gráfico 6. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD12. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

### Mezcla asfáltica MD20

Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo con laboratorios de adherencia, ahuellamiento, fatiga y módulo, para cada una de las mezclas.

Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 19. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD20. Planta 1

|               | TIPO DE AGREGADO     | ORÍGEN                              | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| GRANULOMETRÍA | Arena triturada fina | Río Guayuriba - Formación Guadalupe | IDU-ET-510-11  |
|               | Arena triturada      | Río Guayuriba                       | IDU-ET-510-11  |
|               | Grava de 1/2" y 3/4" | Río Guayuriba                       | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente: Privada

Tabla 20. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1

|                 | ENSAYO                                     | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706              | 69        | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712              | 49        | 45 - 55 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa - s)         | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 294       | 150-300    |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada.

Tabla 21. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1

|                                | ENSAYO                                     | NORMA              | RESULTADO | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|-----------|---------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13 | 4,8       | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13     | 75        | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13     | 1419      | ≥900Kg/29000N |
|                                | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13     | 3,1       | 2,0 a 3,5mm   |
|                                | Vacíos con aire Va, (%)                    | Rodadura           | 4,8       | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Intermedia         |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Base               |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%) | Mezclas 20         | 15,0      | 214           |
|                                |                                            | Mezclas 12         |           | 215           |
|                                |                                            | Mezclas 10         |           | 216           |
|                                | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13     | 69        | 65 a 75%      |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada.

## Fatiga

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas con deformación constante bajo la norma UNE-EN 129697-24:

ANEXO D.

Tabla 22. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 1

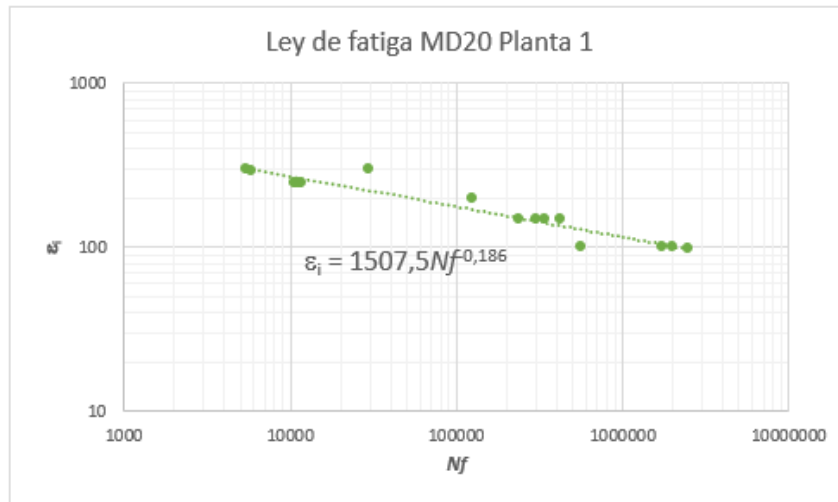
| <b>FATIGA MD20 PLANTA 1</b>                           |                                       |                        |                          |                           |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b><math>\varepsilon</math> (<math>\mu</math>def)</b> | <b><math>\varepsilon</math> (def)</b> | <b><math>Nf</math></b> | <b><math>Ln e</math></b> | <b><math>Ln Nf</math></b> |
| 100                                                   | 0,000100                              | 1980000                | 2,00000                  | 6,29667                   |
| 98                                                    | 0,000098                              | 2500000                | 1,99123                  | 6,39794                   |
| 100                                                   | 0,000100                              | 1729781                | 2,00000                  | 6,23799                   |
| 100                                                   | 0,000100                              | 567397                 | 2,00000                  | 5,75389                   |
| 150                                                   | 0,000150                              | 301200                 | 2,17609                  | 5,47885                   |
| 147                                                   | 0,000147                              | 424635                 | 2,16732                  | 5,62802                   |
| 148                                                   | 0,000148                              | 339209                 | 2,17026                  | 5,53047                   |
| 250                                                   | 0,000250                              | 11689                  | 2,39794                  | 4,06778                   |
| 250                                                   | 0,000250                              | 11506                  | 2,39794                  | 4,06092                   |
| 250                                                   | 0,000250                              | 10750                  | 2,39794                  | 4,03141                   |
| 250                                                   | 0,000250                              | 10687                  | 2,39794                  | 4,02886                   |
| 197                                                   | 0,000197                              | 124760                 | 2,29447                  | 5,09608                   |
| 300                                                   | 0,000300                              | 5469                   | 2,47712                  | 3,73791                   |
| 290                                                   | 0,000290                              | 5830                   | 2,46240                  | 3,76567                   |
| 300                                                   | 0,000300                              | 29447                  | 2,47712                  | 4,46904                   |
| 150                                                   | 0,000150                              | 236180                 | 2,17609                  | 5,37324                   |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos con deformación constante. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **115** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1507,5Nf^{-0.186}$$

Gráfico 7. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 1



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

## Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 23. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta1

| ADHERENCIA MD20 PLANTA 1                                 |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 2             | 64,9        | 101,6         | 1062             | 1025,3                         | 145,9                          |
|                                                          | 5             | 65,3        | 101,6         | 924              | 886,6                          | 126,1                          |
|                                                          | 6             | 65          | 101,6         | 1003             | 966,9                          | 137,5                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 959,6                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 136,5                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN       | RESISTENCIA A LA TENSIÓN       |
| 2                                                        | 1             | 65,2        | 101,6         | 843              | 810,2                          | 115,3                          |
|                                                          | 3             | 64,4        | 101,6         | 931              | 905,8                          | 128,9                          |
|                                                          | 4             | 64,1        | 101,6         | 817              | 798,6                          | 113,6                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 838,2                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 119,3                          |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua y en seco. Fuente: Privada.

Tabla 24. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta1

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>RELACIÓN DE<br/>RESISTENCIA A LA<br/>TENSIÓN (%) MD20</b> | <b>87%</b> |
|--------------------------------------------------------------|------------|

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Propia

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)

Tabla 25. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD20 PLANTA 1 |                  |                    |                     |              |                  |                    |                     |              |                  |                    |                     |                     |
|------------------------------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------|--------------------|---------------------|--------------|------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| PROBETA 1                          |                  |                    |                     | PROBETA 2    |                  |                    |                     | PROBETA 3    |                  |                    |                     | PROMEDIO DEF ( μm)  |
| Tiempo (min)                       | Deformación (mm) | Deformación ( μm)  | Diferencia (mm)     | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación ( μm)  | Diferencia (mm)     | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación ( μm)  | Diferencia (mm)     |                     |
| 0                                  | 0,070            | 70                 | 0,000               | 0            | 0,083            | 83                 | 0,000               | 0            | 0,071            | 71                 | 0,000               | 75                  |
| 1                                  | 0,110            | 110                | 0,040               | 1            | 0,227            | 227                | 0,144               | 1            | 0,166            | 166                | 0,095               | 168                 |
| 3                                  | 0,301            | 301                | 0,191               | 3            | 0,366            | 366                | 0,139               | 3            | 0,330            | 330                | 0,164               | 332                 |
| 5                                  | 0,389            | 389                | 0,088               | 5            | 0,438            | 438                | 0,072               | 5            | 0,413            | 413                | 0,083               | 413                 |
| 10                                 | 0,513            | 513                | 0,124               | 10           | 0,530            | 530                | 0,092               | 10           | 0,517            | 517                | 0,104               | 520                 |
| 15                                 | 0,579            | 579                | 0,066               | 15           | 0,589            | 589                | 0,059               | 15           | 0,580            | 580                | 0,063               | 583                 |
| 20                                 | 0,612            | 612                | 0,033               | 20           | 0,644            | 644                | 0,055               | 20           | 0,619            | 619                | 0,039               | 625                 |
| 25                                 | 0,636            | 636                | 0,024               | 25           | 0,702            | 702                | 0,058               | 25           | 0,652            | 652                | 0,033               | 663                 |
| 30                                 | 0,663            | 663                | 0,027               | 30           | 0,732            | 732                | 0,030               | 30           | 0,690            | 690                | 0,038               | 695                 |
| 35                                 | 0,681            | 681                | 0,018               | 35           | 0,767            | 767                | 0,035               | 35           | 0,713            | 713                | 0,023               | 720                 |
| 40                                 | 0,700            | 700                | 0,019               | 40           | 0,798            | 798                | 0,031               | 40           | 0,762            | 762                | 0,049               | 753                 |
| 45                                 | 0,710            | 710                | 0,010               | 45           | 0,827            | 827                | 0,029               | 45           | 0,781            | 781                | 0,019               | 773                 |
| 60                                 | 0,745            | 745                | 0,035               | 60           | 0,894            | 894                | 0,067               | 60           | 0,829            | 829                | 0,048               | 823                 |
| 75                                 | 0,761            | 761                | 0,016               | 75           | 0,957            | 957                | 0,063               | 75           | 0,845            | 845                | 0,016               | 854                 |
| 90                                 | 0,792            | 792                | 0,031               | 90           | 1,013            | 1013               | 0,056               | 90           | 0,902            | 902                | 0,057               | 902                 |
| 105                                | 0,816            | 816                | 0,024               | 105          | 1,066            | 1066               | 0,053               | 105          | 0,941            | 941                | 0,039               | 941                 |
| 120                                | 0,839            | 839                | 0,023               | 120          | 1,107            | 1107               | 0,041               | 120          | 0,965            | 965                | 0,024               | 970                 |
| PROBETA 1                          |                  |                    |                     | PROBETA 2    |                  |                    |                     | PROBETA 3    |                  |                    |                     | PROMEDIO PROBETAS   |
| PERIODO                            | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad ( μm/min) | PERIODO      | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad ( μm/min) | PERIODO      | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad ( μm/min) | Velocidad ( μm/min) |
| 30 - 45                            | 0,047            | 0,0031             | 3,1                 | 30 - 45      | 0,095            | 0,0063             | 6,3                 | 30 - 45      | 0,091            | 0,0061             | 6,1                 | 5,2                 |
| 75 - 90                            | 0,031            | 0,0021             | 2,066666667         | 75 - 90      | 0,056            | 0,0037             | 3,7                 | 75 - 90      | 0,057            | 0,0038             | 3,8                 | 3,2                 |
| 105 - 120                          | 0,023            | 0,0015             | 1,533333333         | 105 - 120    | 0,041            | 0,0027             | 2,7                 | 105 - 120    | 0,024            | 0,0016             | 1,6                 | 2,0                 |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup> Fuente: Privada

Tabla 26. Velocidad en  $\mu\text{m}/\text{min}$  obtenida según especificación. Planta 1

| <i>PROMEDIO<br/>PROBETAS</i>              | <i>ESPECIFICACIÓN<br/>MENOR QUE</i>       |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Velocidad<br>( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) | Velocidad<br>( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) |
| 2,0                                       | 15,0                                      |

### Módulos

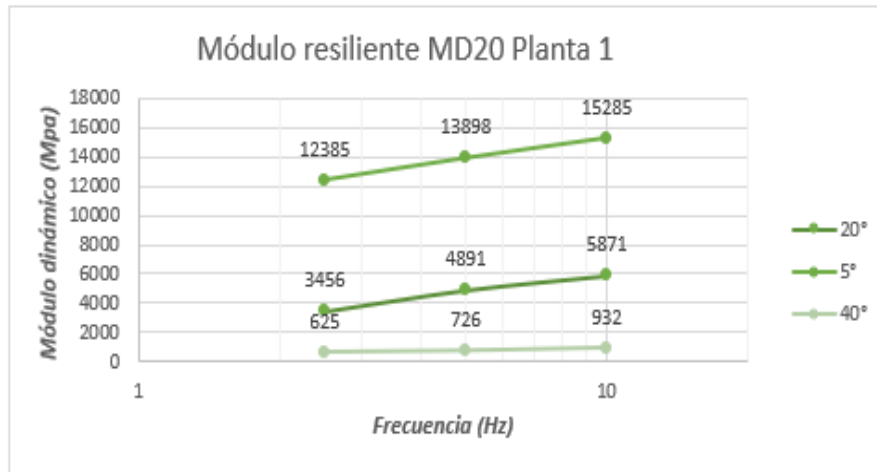
Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

Tabla 27. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD20. Planta 1

| <i>MODULO RESILIENTE MD20 PLANTA 1</i> |                         |                        |
|----------------------------------------|-------------------------|------------------------|
| <i>Temp. (°C)</i>                      | <i>Frecuencia (Hz)</i>  | <i>Módulo Dinámico</i> |
| 5°                                     | 10                      | 15285                  |
|                                        | 5                       | 13898                  |
|                                        | 2,5                     | 12385                  |
| 20°                                    | 10                      | 5871                   |
|                                        | 5                       | 4891                   |
|                                        | 2,5                     | 3456                   |
| 40°                                    | 10                      | 932                    |
|                                        | 5                       | 726                    |
|                                        | 2,5                     | 625                    |
| <i>Frecuencia</i>                      | <i>Temperatura (°C)</i> | <i>Módulo Dinámico</i> |
| 2,5 Hz                                 | 5                       | 12385                  |
|                                        | 20                      | 3456                   |
|                                        | 40                      | 625                    |
| 5 Hz                                   | 5                       | 13898                  |
|                                        | 20                      | 4891                   |
|                                        | 40                      | 726                    |
| 10 Hz                                  | 5                       | 15285                  |
|                                        | 20                      | 5871                   |
|                                        | 40                      | 932                    |

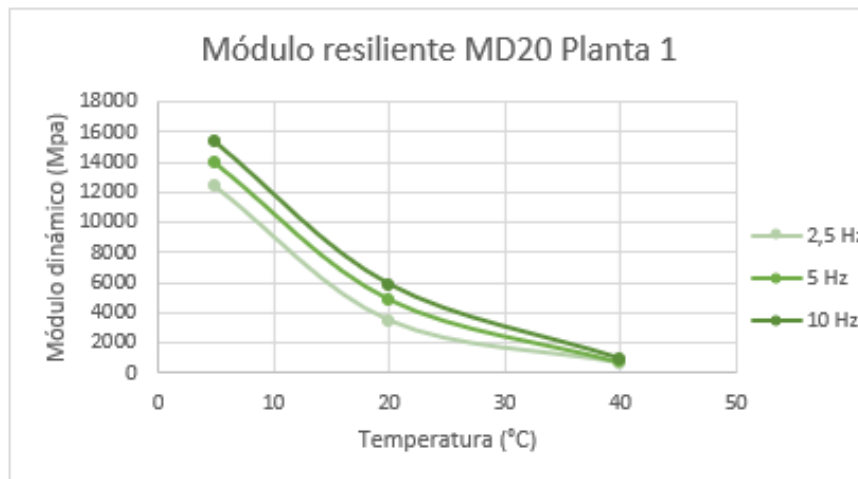
Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada

Gráfico 8. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.

Gráfico 9. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 1



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

## Planta 2

La información suministrada, está relacionada con el sistema de gestión de calidad, procesos de la planta y el laboratorio, control de calidad a las materias primas y al producto terminado y los ensayo y análisis de resultados obtenidos del proceso de formulación por el

método Marshall, junto con las pruebas de verificación de diseño cumpliendo con las especificaciones técnicas IDU-ET-510-11.

### Mezcla asfáltica GCR

Mezcla asfáltica en caliente con asfaltos modificados con caucho por vía húmeda con laboratorios de adherencia, deformación plástica en pista de ensayo, ley de fatiga y modulo dinámico resiliente, para cada una de las mezclas. Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 28. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. Planta 2.

| GRANULOMETRÍA | TIPO DE AGREGADO       | ORÍGEN                  | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|------------------------|-------------------------|----------------|
|               | Agregado pétreo fino   | Crudo del río Coello    | IDU-ET-510-11  |
|               | Agregado pétreo grueso | Crudo del río Guayuriba | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente: Privada

Tabla 29. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2.

| TIPO DE ASFALTO | ENSAYO                                     | NORMA          | RESULTADO | PARÁMETRO   |
|-----------------|--------------------------------------------|----------------|-----------|-------------|
|                 | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706-13 | 53        | 40-70       |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712-13 | 72        | ≥ 52        |
|                 | Viscosidad Brookfield a 163°C, (cP/Pa-s)   | I.N.V.E-717-13 | 3000      | 1500 - 3000 |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada.

Tabla 30. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2

| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | ENSAYO                                            |            | NORMA                          | RESULTADO  | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|------------|--------------------------------|------------|---------------|
|                                | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON GCR (%) |            | I.N.V.E-748-13                 | 6,5        | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                        |            | I.N.V.E-748-13                 | 75         | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                         |            | I.N.V.E-748-13                 | 1337/13116 | ≥900Kg/≥9000N |
|                                | Flujo (mm)                                        |            | I.N.V.E-748-13                 | 4,2        | >2,0mm        |
|                                | Vacíos con aire Va, (%)                           | Rodadura   | I.N.V.E-736/799-13 Manual MS-2 | 4,0        | 3,0 a 5,0%    |
|                                |                                                   | Intermedia |                                |            | 3,0 a 5,0%    |
|                                |                                                   | Base       |                                |            | 3,0 a 5,0%    |
|                                | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%)        | Mezclas 20 | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2     | 15,4       | -             |
|                                |                                                   | Mezclas 12 |                                |            | -             |
|                                |                                                   | Mezclas 10 |                                |            | -             |
|                                | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)                 |            | I.N.V.E-799-13                 | 74         | -             |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada.



### Fatiga

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 31. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 2

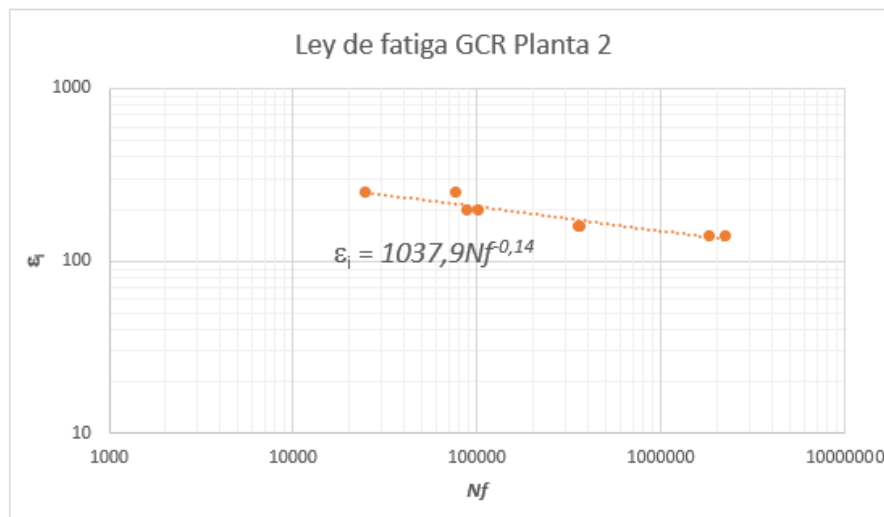
| FATIGA GCR PLANTA 2               |                     |         |         |         |
|-----------------------------------|---------------------|---------|---------|---------|
| $\varepsilon$ ( $\mu\text{def}$ ) | $\varepsilon$ (def) | Nf      | Ln e    | Ln Nf   |
| 250                               | 0,000340            | 75836   | 2,39794 | 4,87988 |
| 200                               | 0,000250            | 100824  | 2,30103 | 5,00356 |
| 140                               | 0,000270            | 1831054 | 2,14613 | 6,26270 |
| 160                               | 0,000380            | 356512  | 2,20412 | 5,55207 |
| 160                               | 0,000300            | 365118  | 2,20412 | 5,56243 |
| 200                               | 0,000200            | 88172   | 2,30103 | 4,94533 |
| 140                               | 0,000240            | 2254021 | 2,14613 | 6,35296 |
| 250                               | 0,000420            | 24720   | 2,39794 | 4,39305 |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **149** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1038Nf^{-0.140}$$

Gráfico 10. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. Planta 2.



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

### Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 32. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta2

| ADHERENCIA GCR PLANTA 2                                  |               |             |               |                  |                          |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                          |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Díámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 4             | 64,4        | 101,6         | 736              | 716,1                    | 101,9                          |
|                                                          | 5             | 64,7        | 101,6         | 657              | 636,3                    | 90,5                           |
|                                                          | 6             | 65,1        | 101,6         | 719              | 692                      | 98,4                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 681,5                    |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 96,9                     |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                          |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Díámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA         | RESISTENCIA A LA TENSIÓN       |
| 2                                                        | 1             | 64,7        | 101,6         | 600              | 581,1                    | 82,7                           |
|                                                          | 2             | 63,2        | 101,6         | 604              | 598,8                    | 85,2                           |
|                                                          | 3             | 64,7        | 101,6         | 638              | 617,9                    | 87,9                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 599,3                    |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 85,3                     |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua, y en seco. Fuente: Privada.

Tabla 33. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. Planta2

| RELACIÓN DE<br>RESISTENCIA A LA<br>TENSIÓN (%) GCR |
|----------------------------------------------------|
| 88%                                                |

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Privada.

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)

Tabla 34. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA GCR PLANTA 2 |                  |                  |                 |              |                  |                  |                 |              |
|-----------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|
| PROBETA 1                         |                  |                  |                 | PROBETA 2    |                  |                  |                 | PROMEDIO DEF |
| Tiempo (min)                      | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | (μm)         |
| 0                                 | 0,00             | 0                | 0,000           | 0            | 0,00             | 0                | 0,000           | 0            |
| 1                                 | 0,43             | 43               | 0,430           | 1            | 0,85             | 850              | 0,850           | 447          |
| 3                                 | 0,70             | 700              | 0,270           | 3            | 1,16             | 1160             | 0,310           | 930          |
| 5                                 | 0,81             | 810              | 0,110           | 5            | 1,29             | 1290             | 0,130           | 1050         |
| 10                                | 1,04             | 1040             | 0,230           | 10           | 1,56             | 1560             | 0,270           | 1300         |
| 15                                | 1,25             | 1250             | 0,210           | 15           | 1,77             | 1770             | 0,210           | 1510         |
| 20                                | 1,38             | 1380             | 0,130           | 20           | 1,91             | 1910             | 0,140           | 1645         |
| 25                                | 1,50             | 1500             | 0,120           | 25           | 2,04             | 2040             | 0,130           | 1770         |
| 30                                | 1,61             | 1610             | 0,110           | 30           | 2,15             | 2150             | 0,110           | 1880         |
| 35                                | 1,70             | 1700             | 0,090           | 35           | 2,23             | 2230             | 0,080           | 1965         |
| 40                                | 1,81             | 1810             | 0,110           | 40           | 2,32             | 2320             | 0,090           | 2065         |
| 45                                | 1,89             | 1890             | 0,080           | 45           | 2,39             | 2390             | 0,070           | 2140         |
| 60                                | 2,09             | 2090             | 0,200           | 60           | 2,58             | 2580             | 0,190           | 2335         |
| 75                                | 2,28             | 2280             | 0,190           | 75           | 2,74             | 2740             | 0,160           | 2510         |
| 90                                | 2,45             | 2450             | 0,170           | 90           | 2,87             | 2870             | 0,130           | 2660         |
| 105                               | 2,59             | 2590             | 0,140           | 105          | 2,99             | 2990             | 0,120           | 2790         |
| 120                               | 2,71             | 2710             | 0,120           | 120          | 3,10             | 3100             | 0,110           | 2905         |

| PROBETA 1 |                  |                    |                    | PROBETA 2 |                  |                    |                    | PROMEDIO |
|-----------|------------------|--------------------|--------------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------|----------|
| PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (μm/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (μm/min) | PROBETAS |
| 30 - 45   | 0,280            | 0,0187             | 18,7               | 30 - 45   | 0,240            | 0,0160             | 16,0               | 17,3     |
| 75 - 90   | 0,170            | 0,0113             | 11,3               | 75 - 90   | 0,130            | 0,0087             | 8,7                | 10,0     |
| 105 - 120 | 0,120            | 0,0080             | 8,0                | 105 - 120 | 0,110            | 0,0073             | 7,3                | 7,7      |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup> Fuente: Privada

Tabla 35. Velocidad en μm/min obtenida según especificación. Planta 2

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (μm/min) | Velocidad (μm/min)       |
| 7,7                | 15,0                     |

## Módulos

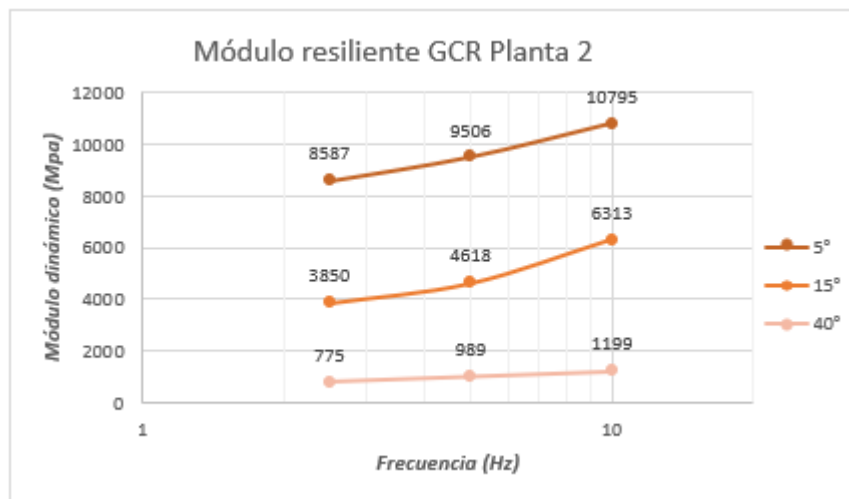
Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

Tabla 36. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica GCR. Planta 2

| MODULO RESILIENTE GCR PLANTA 2 |                 |                       |
|--------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                     | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                             | 10              | 10795                 |
|                                | 5               | 9506                  |
|                                | 2,5             | 8587                  |
|                                | 10              | 6313                  |
| 15°                            | 5               | 4618                  |
|                                | 2,5             | 3850                  |
|                                | 10              | 1199                  |
|                                | 5               | 989                   |
| 40°                            | 2,5             | 775                   |
|                                |                 |                       |
| Frecuencia (Hz)                | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10 Hz                          | 5               | 10795                 |
|                                | 15              | 6313                  |
|                                | 40              | 1199                  |
|                                | 5               | 9506                  |
| 5 Hz                           | 15              | 4618                  |
|                                | 40              | 989                   |
|                                | 5               | 8587                  |
|                                |                 |                       |
| 2,5 Hz                         | 15              | 3850                  |
|                                | 40              | 775                   |

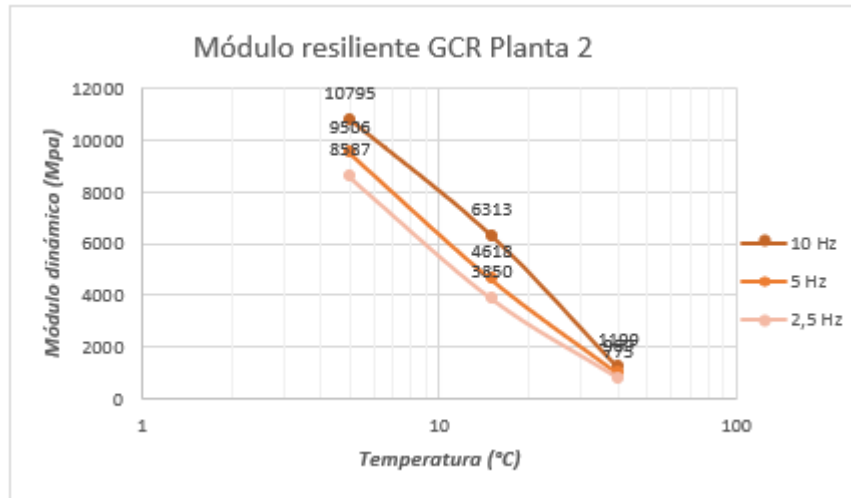
Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada

Gráfico 11. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.

Gráfico 12. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con GCR. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

### Mezcla asfáltica MD12

Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo con laboratorios de adherencia, ahuellamiento, fatiga y módulo, para cada una de las mezclas. Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 37. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD12. Planta 2

|               | TIPO DE AGREGADO       | ORÍGEN                  | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|------------------------|-------------------------|----------------|
| GRANULOMETRÍA | Agregado pétreo fino   | Crudo del río Coello    | IDU-ET-510-11  |
|               | Agregado pétreo grueso | Crudo del río Guayuriba | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente: Privada

Tabla 38. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2

|                 | ENSAYO                                     | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706              | 63        | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712              | 48,7      | 45 - 55 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa)             | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 2010      | 1500-3000P |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada..

Tabla 39. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2

| ENSAYO                         |                                            | NORMA                          | RESULTADO | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13             | 5,7       | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13                 | 75        | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13                 | 1350      | ≥900Kg/≥9000N |
|                                | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13                 | 3,1       | 2,0 a 3,5mm   |
|                                | Vacíos con aire Va, (%)                    | Rodadura Intermedia            |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | I.N.V.E-736/799-13 Manual MS-2 | 5,0       | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Base                           |           | 4,0 a 6,0%    |
|                                | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%) | Mezclas 20                     |           | ≥14           |
|                                |                                            | Mezclas 12                     | 15,9      | ≥15           |
|                                |                                            | Mezclas 10                     |           | ≥16           |
|                                | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13                 | 69        | 65 a 75%      |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada..

## Fatiga

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 40. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 2

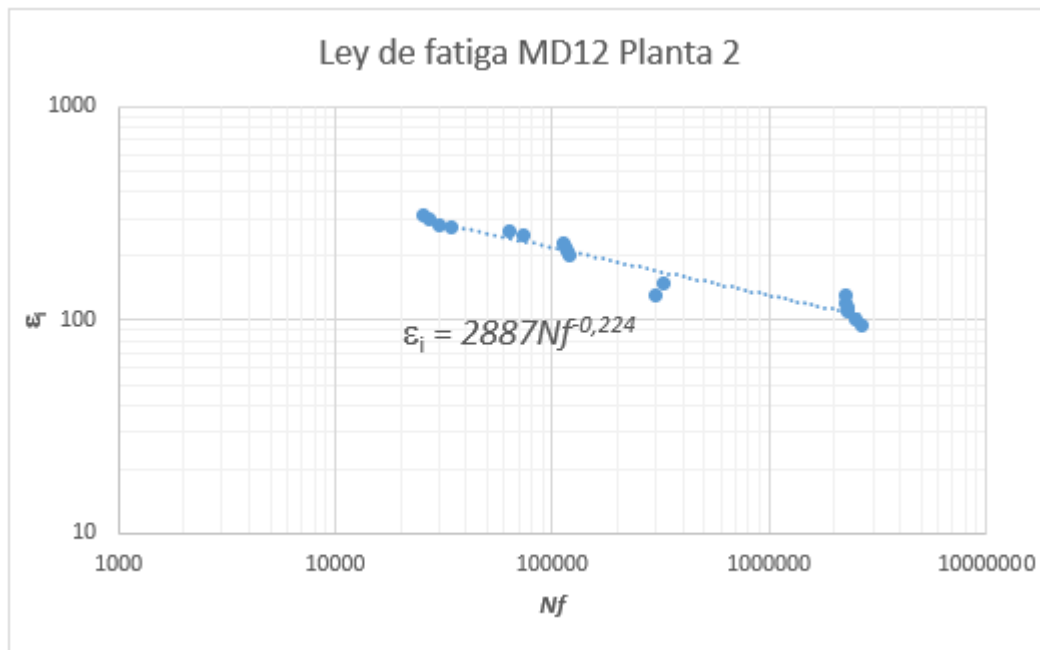
| FATIGA MD12 PLANTA 2     |                  |         |         |         |
|--------------------------|------------------|---------|---------|---------|
| $\epsilon$ ( $\mu def$ ) | $\epsilon$ (def) | Nf      | Ln e    | Ln Nf   |
| 200                      | 0,000200         | 119387  | 2,30103 | 5,07696 |
| 230                      | 0,000230         | 112974  | 2,36173 | 5,05298 |
| 250                      | 0,000250         | 72841   | 2,39794 | 4,86238 |
| 300                      | 0,000300         | 27239   | 2,47712 | 4,43519 |
| 150                      | 0,000150         | 325231  | 2,17609 | 5,51219 |
| 95                       | 0,000095         | 2684298 | 1,97772 | 6,42883 |
| 275                      | 0,000275         | 34281   | 2,43933 | 4,53505 |
| 120                      | 0,000120         | 2250361 | 2,07918 | 6,35225 |
| 100                      | 0,000100         | 2500000 | 2,00000 | 6,39794 |
| 260                      | 0,000260         | 62832   | 2,41497 | 4,79818 |
| 280                      | 0,000280         | 30150   | 2,44716 | 4,47929 |
| 310                      | 0,000310         | 25630   | 2,49136 | 4,40875 |
| 130                      | 0,000130         | 298360  | 2,11394 | 5,47474 |
| 110                      | 0,000110         | 2315000 | 2,04139 | 6,36455 |
| 115                      | 0,000115         | 2283500 | 2,06070 | 6,35860 |
| 210                      | 0,000210         | 117301  | 2,32222 | 5,06930 |
| 220                      | 0,000220         | 115620  | 2,34242 | 5,06303 |
| 130                      | 0,000130         | 2230013 | 2,11394 | 6,34831 |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **131** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 2887Nf^{-0.224}$$

Gráfico 13. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. Planta 2.



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

### Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 41. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12.  
Planta2

| ADHERENCIA MD12 PLANTA 2                                 |               |             |               |                                   |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                                   |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg)                  | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 64,6        | 101,6         | 1060                              | 1028,2                         | 146,3                          |
|                                                          | 4             | 64,8        | 101,6         | 1007                              | 973,7                          | 138,5                          |
|                                                          | 6             | 65,5        | 101,6         | 1052                              | 1006,4                         | 143,2                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)<br>1002,8<br>(PSI)<br>142,7 |                                |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                                   |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg)                  | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 2             | 65,1        | 101,6         | 897                               | 863,4                          | 122,8                          |
|                                                          | 3             | 66,3        | 101,6         | 923                               | 872,3                          | 124,1                          |
|                                                          | 5             | 64,1        | 101,6         | 892                               | 872                            | 124                            |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)<br>869,2<br>(PSI)<br>123,6  |                                |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua, y en seco. Fuente: Privada.

Tabla 42. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD12.  
Planta2

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| RELACIÓN DE<br>RESISTENCIA A LA<br>TENSIÓN (%) MD12 | 87% |
|-----------------------------------------------------|-----|

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Privada.

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)



Tabla 43. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD12 PLANTA 2 |                  |                  |                 |              |                  |                  |                 |              |                  |                  |                 |                   |
|------------------------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| PROBETA 1                          |                  |                  |                 | PROBETA 2    |                  |                  |                 | PROBETA 3    |                  |                  |                 | PROMEDIO DEF (μm) |
| Tiempo (min)                       | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (μm) | Diferencia (mm) |                   |
| 0                                  | 0,115            | 115              | 0,000           | 0            | 0,110            | 110              | 0,000           | 0            | 0,140            | 140              | 0,000           | 122               |
| 1                                  | 0,218            | 218              | 0,103           | 1            | 0,112            | 112              | 0,002           | 1            | 0,230            | 230              | 0,090           | 187               |
| 3                                  | 0,238            | 238              | 0,020           | 3            | 0,298            | 298              | 0,186           | 3            | 0,418            | 418              | 0,188           | 318               |
| 5                                  | 0,255            | 255              | 0,017           | 5            | 0,346            | 346              | 0,048           | 5            | 0,515            | 515              | 0,097           | 372               |
| 10                                 | 0,400            | 400              | 0,145           | 10           | 0,407            | 407              | 0,061           | 10           | 0,632            | 632              | 0,117           | 480               |
| 15                                 | 0,485            | 485              | 0,085           | 15           | 0,500            | 500              | 0,093           | 15           | 0,875            | 875              | 0,243           | 620               |
| 20                                 | 0,590            | 590              | 0,105           | 20           | 0,617            | 617              | 0,117           | 20           | 0,890            | 890              | 0,015           | 699               |
| 25                                 | 0,617            | 617              | 0,027           | 25           | 0,649            | 649              | 0,032           | 25           | 0,910            | 910              | 0,020           | 725               |
| 30                                 | 0,673            | 673              | 0,056           | 30           | 0,758            | 758              | 0,109           | 30           | 0,940            | 940              | 0,030           | 790               |
| 35                                 | 0,717            | 717              | 0,044           | 35           | 0,852            | 852              | 0,094           | 35           | 0,980            | 980              | 0,040           | 850               |
| 40                                 | 0,784            | 784              | 0,067           | 40           | 0,902            | 902              | 0,050           | 40           | 1,100            | 1100             | 0,120           | 929               |
| 45                                 | 0,806            | 806              | 0,022           | 45           | 1,012            | 1012             | 0,110           | 45           | 1,190            | 1190             | 0,090           | 1003              |
| 60                                 | 0,950            | 950              | 0,144           | 60           | 1,236            | 1236             | 0,224           | 60           | 1,195            | 1195             | 0,005           | 1127              |
| 75                                 | 1,081            | 1081             | 0,131           | 75           | 1,240            | 1240             | 0,004           | 75           | 1,206            | 1206             | 0,011           | 1176              |
| 90                                 | 1,119            | 1119             | 0,038           | 90           | 1,335            | 1335             | 0,095           | 90           | 1,246            | 1246             | 0,040           | 1233              |
| 105                                | 1,321            | 1321             | 0,202           | 105          | 1,511            | 1511             | 0,176           | 105          | 1,282            | 1282             | 0,036           | 1371              |
| 120                                | 1,450            | 1450             | 0,129           | 120          | 1,564            | 1564             | 0,053           | 120          | 1,344            | 1344             | 0,062           | 1453              |

| PROBETA 1 |                  |                             | PROBETA 2 |                  |                             | PROBETA 3 |                  |                             | PROMEDIO PROBETAS Velocidad (μm/min) |
|-----------|------------------|-----------------------------|-----------|------------------|-----------------------------|-----------|------------------|-----------------------------|--------------------------------------|
| PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) (μm/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) (μm/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) (μm/min) |                                      |
| 30 - 45   | 0,133            | 0,0089 8,9                  | 30 - 45   | 0,254            | 0,0169 16,9                 | 30 - 45   | 0,250            | 0,0167 16,7                 | 14,2                                 |
| 75 - 90   | 0,038            | 0,0025 2,5                  | 75 - 90   | 0,095            | 0,0063 6,3                  | 75 - 90   | 0,040            | 0,0027 2,7                  | 3,8                                  |
| 105 - 120 | 0,129            | 0,0086 8,6                  | 105 - 120 | 0,053            | 0,0035 3,5                  | 105 - 120 | 0,062            | 0,0041 4,1                  | 5,4                                  |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup>. Fuente: Privada

Tabla 44. Velocidad en μm/min obtenida según especificación. Planta 2

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (μm/min) | Velocidad (μm/min)       |
| 5,4                | 15,0                     |

## Módulos

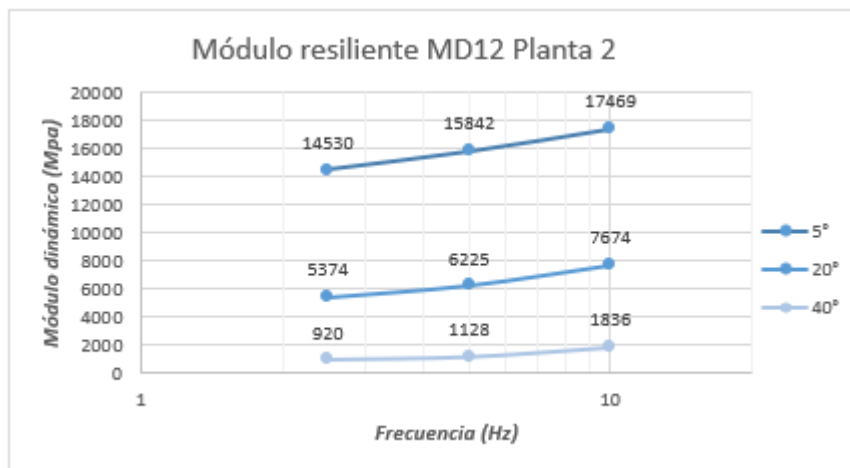
Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

Tabla 45. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD12. Planta 2

| MODULO RESILIENTE MD12 PLANTA 2 |                 |                       |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                      | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                              | 10              | 17469                 |
|                                 | 5               | 15842                 |
|                                 | 2,5             | 14530                 |
|                                 | 10              | 7674                  |
| 20°                             | 5               | 6225                  |
|                                 | 2,5             | 5374                  |
|                                 | 10              | 1836                  |
| 40°                             | 5               | 1128                  |
|                                 | 2,5             | 920                   |
| Frecuencia (Hz)                 | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10 Hz                           | 5               | 17469                 |
|                                 | 15              | 7674                  |
|                                 | 40              | 1836                  |
| 5 Hz                            | 5               | 15842                 |
|                                 | 15              | 6225                  |
|                                 | 40              | 1128                  |
| 2,5 Hz                          | 5               | 14530                 |
|                                 | 15              | 5374                  |
|                                 | 40              | 920                   |

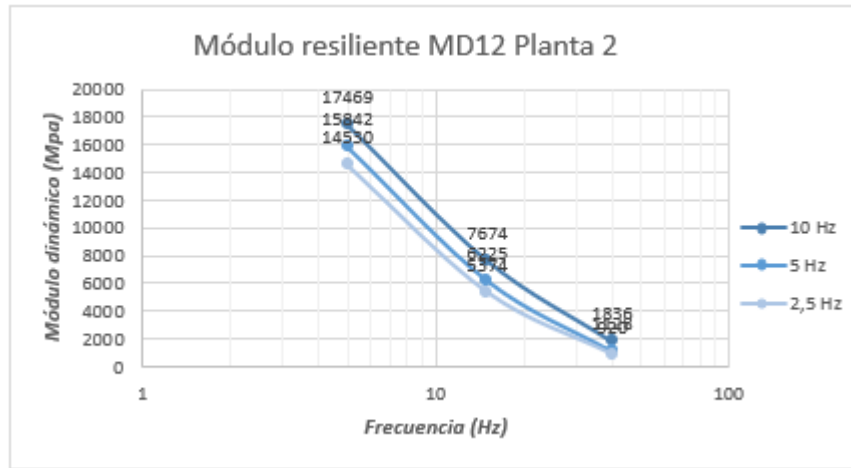
Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada

Gráfico 14. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con MD12. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.

Gráfico 15. Módulo resiliente de mezcla asfáltica con MD12. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

### Mezcla asfáltica MD20

Mezclas asfálticas en caliente densas, semidensas, gruesas y de alto módulo con laboratorios de adherencia, ahuellamiento, fatiga y módulo, para cada una de las mezclas. Esta mezcla cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 46. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| GRANULOMETRÍA | TIPO DE AGREGADO       | ORÍGEN                  | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|------------------------|-------------------------|----------------|
|               | Agregado pétreo fino   | Crudo del río Coello    | IDU-ET-510-11  |
|               | Agregado pétreo grueso | Crudo del río Guayuriba | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los agregados de origen aluvial son producidos mediante estos procesos de trituración. Fuente: Privada

Tabla 47. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| TIPO DE ASFALTO | ENSAYO                                     | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
|                 | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706              | 63        | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712              | 48,7      | 45 - 55 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa )            | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 2010      | 1500-3000P |

Nota: Se elaboran estos ensayos efectuados por el laboratorio de la planta garantizando el cumplimiento respecto a los requerimientos de la especificación IDU-ET-560-11. Fuente: Privada.

Tabla 48. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| ENSAYO                         |                                            | NORMA              | RESULTADO                      | PARÁMETRO     |
|--------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13 | 4,9                            | -             |
|                                | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13     | 75                             | -             |
|                                | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13     | 1305                           | ≥900Kg/≥9000N |
|                                | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13     | 2,9                            | 2,0 a 3,5mm   |
|                                | Rodadura                                   |                    |                                | 4,0 a 6,0%    |
|                                | Vacios con aire Va, (%)                    | Intermedia         | I.N.V.E-736/799-13 Manual MS-2 | 5,0           |
|                                |                                            | Base               |                                | 4,0 a 6,0%    |
|                                |                                            | Mezclas 20         |                                | ≥14           |
|                                | Vacios en los agregados minerales VAM, (%) | Mezclas 12         | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2     | 15,6          |
|                                |                                            | Mezclas 10         |                                | ≥16           |
|                                | Vacios llenos de asfalto VFA, (%)          |                    | I.N.V.E-799-13                 | 70            |
|                                |                                            |                    |                                | 65 a 75%      |

Nota: La mezcla se diseñó para un nivel o categoría de tránsito T4-T5 Fuente: Privada.

### Fatiga

Este laboratorio se realizó mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas con deformación constante bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 49. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 2

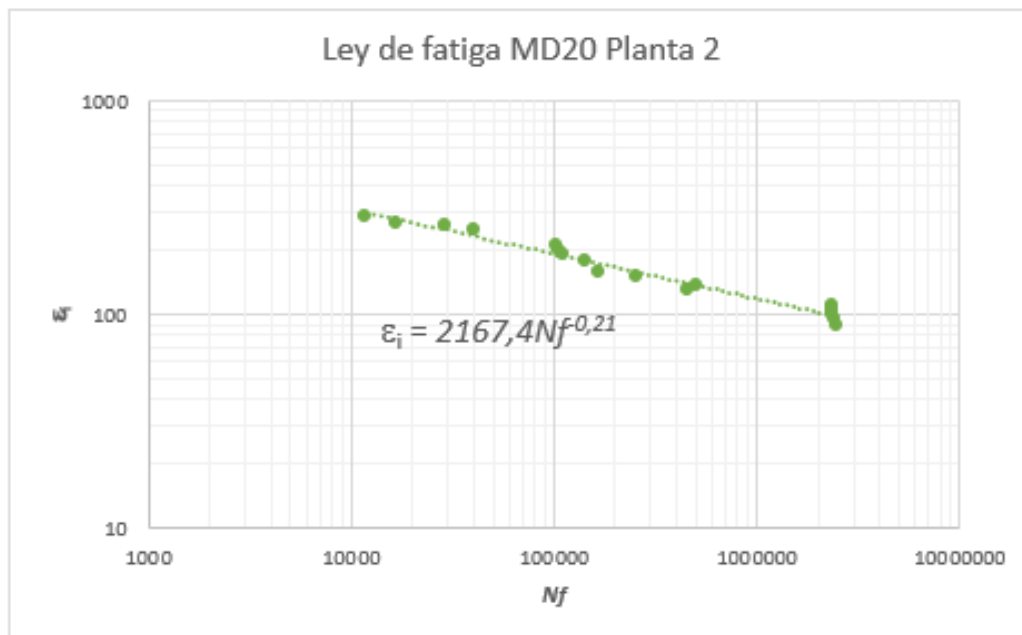
| FATIGA MD20 PLANTA 2    |                  |         |         |         |
|-------------------------|------------------|---------|---------|---------|
| $\epsilon$ ( $\mu$ def) | $\epsilon$ (def) | Nf      | Ln e    | Ln Nf   |
| 180                     | 0,000180         | 142768  | 2,25527 | 5,15463 |
| 150                     | 0,000150         | 251538  | 2,17609 | 5,40060 |
| 210                     | 0,000210         | 101935  | 2,32222 | 5,00832 |
| 200                     | 0,000200         | 104072  | 2,30103 | 5,01733 |
| 160                     | 0,000160         | 165942  | 2,20412 | 5,21996 |
| 250                     | 0,000250         | 40027   | 2,39794 | 4,60235 |
| 260                     | 0,000260         | 28984   | 2,41497 | 4,46216 |
| 190                     | 0,000190         | 111993  | 2,27875 | 5,04919 |
| 130                     | 0,000130         | 451538  | 2,11394 | 5,65469 |
| 287                     | 0,000287         | 11807   | 2,45788 | 4,07214 |
| 270                     | 0,000270         | 16538   | 2,43136 | 4,21848 |
| 137                     | 0,000137         | 507040  | 2,13672 | 5,70504 |
| 90                      | 0,000090         | 2500000 | 1,95424 | 6,39794 |
| 100                     | 0,000100         | 2350000 | 2,00000 | 6,37107 |
| 95                      | 0,000095         | 2386900 | 1,97772 | 6,37783 |
| 110                     | 0,000110         | 2345615 | 2,04139 | 6,37026 |
| 105                     | 0,000105         | 2348201 | 2,02119 | 6,37074 |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos con deformación constante. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **119** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 2167Nf^{-0.210}$$

Gráfico 16. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. Planta 2



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada

### Adherencia

Evaluación de susceptibilidad al agua de las mezclas de concreto asfáltico utilizando la prueba de tracción indirecta (T.S.R) (I.N.V. E-725/13)

Tabla 50. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| ADHERENCIA MD20 PLANTA 2                                 |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROJETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 66,2        | 101,6         | 977              | 924,7                          | 131,6                          |
|                                                          | 2             | 66,8        | 101,6         | 943              | 884,5                          | 125,8                          |
|                                                          | 4             | 67,7        | 101,6         | 1019             | 943,1                          | 134,2                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 917,4                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 130,5                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROJETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN       | RESISTENCIA A LA TENSIÓN       |
| 2                                                        | 3             | 65,3        | 101,6         | 876              | 840,6                          | 119,6                          |
|                                                          | 5             | 66,6        | 101,6         | 789              | 742,3                          | 105,6                          |
|                                                          | 6             | 65,8        | 101,6         | 801              | 762,8                          | 108,5                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 781,9                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 111,2                          |                                |

Nota: Resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua y en seco. Fuente: Privada.

Tabla 51. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| RELACIÓN DE<br>RESISTENCIA A LA<br>TENSIÓN (%) MD12 |
|-----------------------------------------------------|
| 85%                                                 |

Nota: Porcentaje obtenido de la relación de la resistencia a la tensión de probetas acondicionadas en agua entre la resistencia a la tensión de probetas en seco. Fuente: Privada.

### Deformación plástica

Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio (I.N.V.E -756/13)

Tabla 52. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD20 PLANTA 2 |                     |                     |                    |                 |                     |                     |                    |              |                     |                     |                    |                      |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------|---------------------|---------------------|--------------------|----------------------|
| PROBETA 1                          |                     |                     |                    | PROBETA 2       |                     |                     |                    | PROBETA 3    |                     |                     |                    | PROMEDIO<br>DEF (µm) |
| Tiempo<br>(min)                    | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) | Tiempo<br>(min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) | Tiempo (min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(µm) | Diferencia<br>(mm) |                      |
| 0                                  | 0,130               | 130                 | 0,000              | 0               | 0,215               | 215                 | 0,000              | 0            | 0,348               | 348                 | 0,000              | 231                  |
| 1                                  | 0,453               | 453                 | 0,323              | 1               | 0,314               | 314                 | 0,099              | 1            | 0,420               | 420                 | 0,072              | 396                  |
| 3                                  | 0,710               | 710                 | 0,257              | 3               | 0,408               | 408                 | 0,094              | 3            | 0,471               | 471                 | 0,051              | 530                  |
| 5                                  | 0,836               | 836                 | 0,126              | 5               | 0,646               | 646                 | 0,238              | 5            | 0,598               | 598                 | 0,127              | 693                  |
| 10                                 | 1,004               | 1004                | 0,168              | 10              | 0,821               | 821                 | 0,175              | 10           | 0,606               | 606                 | 0,008              | 810                  |
| 15                                 | 1,105               | 1105                | 0,101              | 15              | 0,993               | 993                 | 0,172              | 15           | 0,890               | 890                 | 0,284              | 996                  |
| 20                                 | 1,207               | 1207                | 0,102              | 20              | 1,090               | 1090                | 0,097              | 20           | 0,945               | 945                 | 0,055              | 1081                 |
| 25                                 | 1,290               | 1290                | 0,083              | 25              | 1,110               | 1110                | 0,020              | 25           | 1,010               | 1010                | 0,065              | 1137                 |
| 30                                 | 1,295               | 1295                | 0,005              | 30              | 1,181               | 1181                | 0,071              | 30           | 1,130               | 1130                | 0,120              | 1202                 |
| 35                                 | 1,369               | 1369                | 0,074              | 35              | 1,215               | 1215                | 0,034              | 35           | 1,181               | 1181                | 0,051              | 1255                 |
| 40                                 | 1,397               | 1397                | 0,028              | 40              | 1,256               | 1256                | 0,041              | 40           | 1,212               | 1212                | 0,031              | 1288                 |
| 45                                 | 1,439               | 1439                | 0,042              | 45              | 1,397               | 1397                | 0,141              | 45           | 1,309               | 1309                | 0,097              | 1382                 |
| 60                                 | 1,528               | 1528                | 0,089              | 60              | 1,480               | 1480                | 0,083              | 60           | 1,329               | 1329                | 0,020              | 1446                 |
| 75                                 | 1,579               | 1579                | 0,051              | 75              | 1,501               | 1501                | 0,021              | 75           | 1,415               | 1415                | 0,086              | 1498                 |
| 90                                 | 1,666               | 1666                | 0,087              | 90              | 1,570               | 1570                | 0,069              | 90           | 1,480               | 1480                | 0,065              | 1572                 |
| 105                                | 1,701               | 1701                | 0,035              | 105             | 1,590               | 1590                | 0,020              | 105          | 1,500               | 1500                | 0,020              | 1597                 |
| 120                                | 1,736               | 1736                | 0,035              | 120             | 1,630               | 1630                | 0,040              | 120          | 1,535               | 1535                | 0,035              | 1634                 |

| PROBETA 1 |                     |                       |                       | PROBETA 2 |                     |                       |                       | PROBETA 3 |                     |                       |                       | PROMEDIO<br>PROBETAS<br>Velocidad<br>(µm/min) |
|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------|
| PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) | PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) | PERIODO   | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(µm/min) |                                               |
| 30 - 45   | 0,144               | 0,0096                | 9,6                   | 30 - 45   | 0,216               | 0,0144                | 14,4                  | 30 - 45   | 0,179               | 0,0119                | 11,9                  | 12,0                                          |
| 75 - 90   | 0,087               | 0,0058                | 5,8                   | 75 - 90   | 0,069               | 0,0046                | 4,6                   | 75 - 90   | 0,065               | 0,0043                | 4,3                   | 4,9                                           |
| 105 - 120 | 0,035               | 0,0023                | 2,3                   | 105 - 120 | 0,040               | 0,0027                | 2,7                   | 105 - 120 | 0,035               | 0,0023                | 2,3                   | 2,4                                           |

Nota: El ensayo se realizó con una temperatura de 60°C y una presión de contacto de 9.1 kgf/cm<sup>2</sup>. Fuente: Privada

Tabla 53. Velocidad en µm/min obtenida según especificación. Planta 2

| PROMEDIO<br>PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR<br>QUE |
|-----------------------|-----------------------------|
| Velocidad<br>(µm/min) | Velocidad (µm/min)          |
| 2,4                   | 15,0                        |

## Módulos

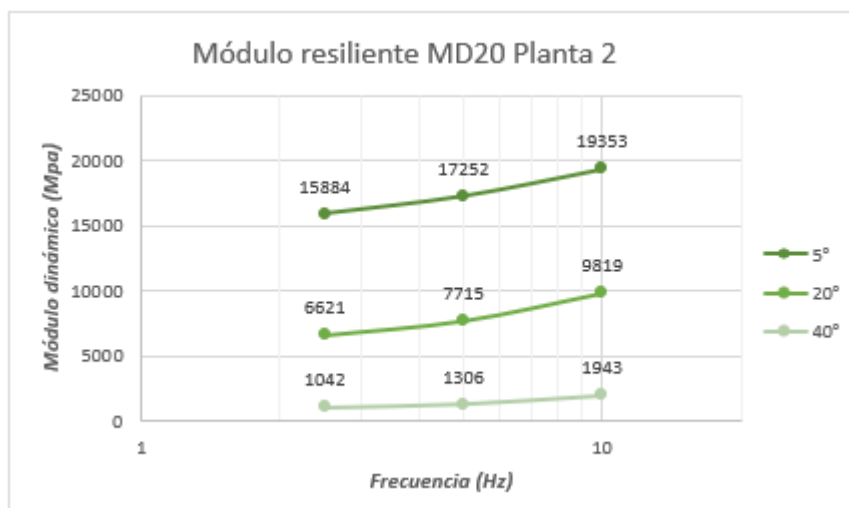
Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente de mezclas asfálticas (I.N.V.E-749/07) (ASTM D4123/82)

Tabla 54. Resultados ensayo módulo resiliente de la mezcla asfáltica MD20. Planta 2

| MODULO RESILIENTE MD20 PLANTA 2 |                 |                       |
|---------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                      | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                              | 10              | 19353                 |
|                                 | 5               | 17252                 |
|                                 | 2,5             | 15884                 |
| 20°                             | 10              | 9819                  |
|                                 | 5               | 7715                  |
|                                 | 2,5             | 6621                  |
| 40°                             | 10              | 1943                  |
|                                 | 5               | 1306                  |
|                                 | 2,5             | 1042                  |
| Frecuencia (Hz)                 | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10 Hz                           | 5               | 19353                 |
|                                 | 15              | 9819                  |
|                                 | 40              | 1943                  |
| 5 Hz                            | 5               | 17252                 |
|                                 | 15              | 7715                  |
|                                 | 40              | 1306                  |
| 2,5 Hz                          | 5               | 15884                 |
|                                 | 15              | 6621                  |
|                                 | 40              | 1042                  |

Nota: El ensayo se realizó a 1,0 KN. Fuente: Privada.

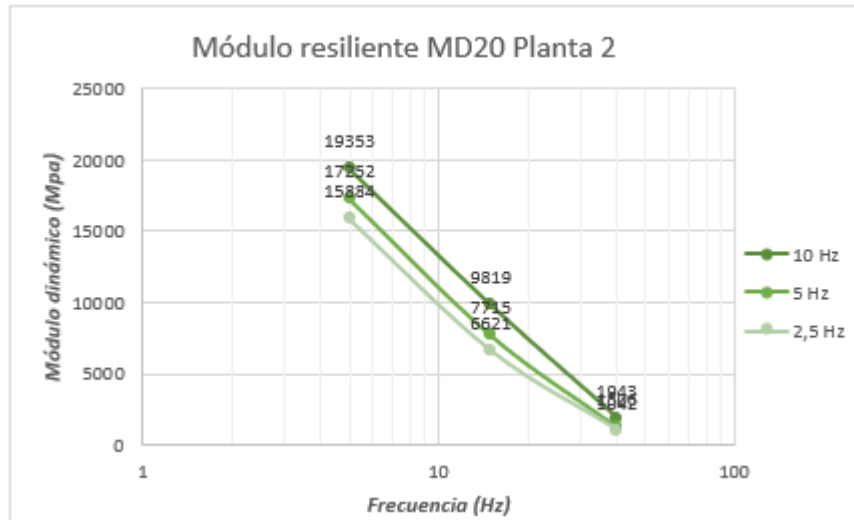
Gráfico 17. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Privada.



Gráfico 18. Módulo resiliente de mezcla asfáltica MD20. Planta 2



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Privada.

#### IDU-1397-17

El contrato publico IDU-1397-17 tenía como propósito la construcción de la Avenida José Celestino Mutis (AC 63) desde la Transversal 112B BIS a (Carrera 114) hasta Carrera 122, en Bogotá D.C.

#### Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR)

A esta mezcla se le realizaron los laboratorios de Fatiga, adherencia, ahuellamiento y modulo, también cuenta con las siguientes especificaciones que se verificaron mediante laboratorios básicos del pavimento, la calidad de los materiales con los que se hará la mezcla asfáltica, con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas establecidas para la ciudad, en este caso Bogotá.

Tabla 55. Granulometría correspondiente para GCR, IDU-1397-17

| GCR - IDU-1397-17 |                           |                |
|-------------------|---------------------------|----------------|
|                   | TIPO DE AGREGADO          | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA     | Arena triturada seca      | IDU-ET-510-11  |
|                   | Agregado grueso 1" y 3/4" | IDU-ET-510-11  |
|                   | Arena lavada              | IDU-ET-510-12  |

*Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.*

Tabla 56. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1397-17

| GCR - IDU-1397-17 |                                            |             |           |           |
|-------------------|--------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
|                   | ENSAYO                                     | NORMA       | RESULTADO | PARÁMETRO |
| ASFALTO           | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, (mm/10)    | I.N.V.E-706 | 43        | 40-70     |
|                   | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712 | 68,2      | ≥ 52      |
|                   | Viscosidad Brookfield a 163°C, (Pa-s)      | I.N.V.E-717 | 2,8       | 1,5 - 3   |

*Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones las cuales están dentro o superaron los parámetros dados.*

Tabla 57. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1397-17

| GCR - IDU-1397-17                    |                                                   |                    |            |               |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|------------|---------------|
|                                      | ENSAYO                                            | NORMA              | RESULTADO  | PARÁMETRO     |
| DISEÑO<br>PRELIMINAR DE<br>LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON GCR (%) | I.N.V.E-748/732-13 | 7,1        | 6,0 - 9,0     |
|                                      | Compactación (golpes/cara)                        | I.N.V.E-748-13     | 75         | -             |
|                                      | Estabilidad mínima (kg/N)                         | I.N.V.E-748-13     | 1391/13646 | ≥900kg/≥9000N |
|                                      | Flujo (mm)                                        | I.N.V.E-748-13     | 3,2        | 2,5 - 5,5     |
|                                      | Vacíos con aire Va, (%)                           | I.N.V.E-736/799-13 | 4,0        | 3,0 a 5,0%    |
|                                      | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%)        | I.N.V.E-799-13     | 16,0       | ≥ 14          |
|                                      |                                                   | Manual MS-2        |            |               |
|                                      | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)                 | I.N.V.E-799-13     | 76         | -             |

*Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones por parte del diseño preliminar de la mezcla.*

## Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas con deformación constante bajo la norma UNE-EN 129697-24:2012

ANEXO D.

Tabla 58. Resultados ensayo de fatiga para GCR, IDU-1397-17

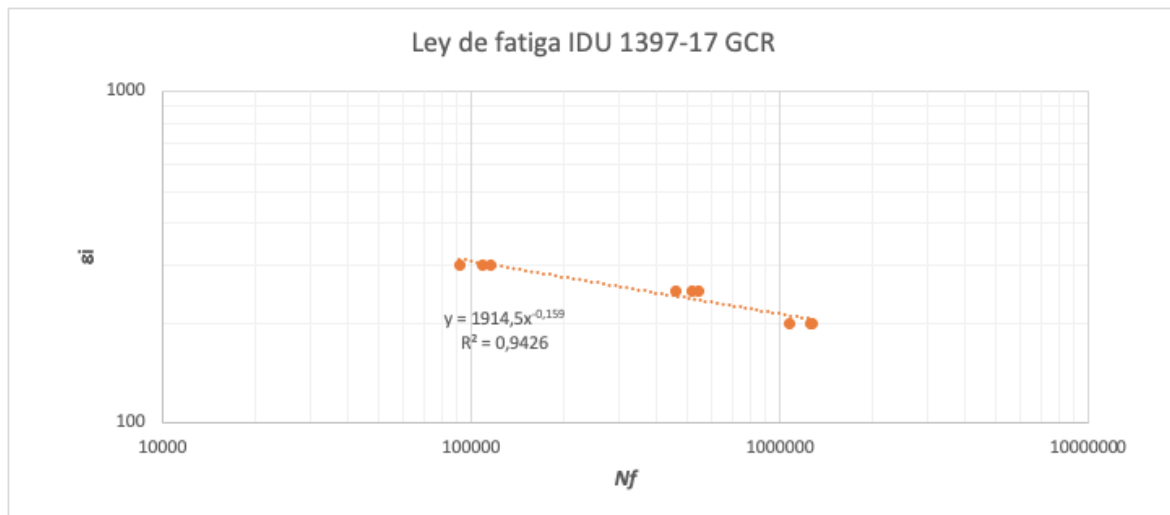
| FATIGA GCR IDU - 1397 |           |         |         |         |
|-----------------------|-----------|---------|---------|---------|
| $e (\propto def)$     | $e (def)$ | $Nf$    | $Ln e$  | $Ln Nf$ |
| 200                   | 0,000200  | 1266795 | 2,30103 | 6,10271 |
| 200                   | 0,000200  | 1069927 | 2,30103 | 6,02935 |
| 200                   | 0,000200  | 1268361 | 2,30103 | 6,10324 |
| 250                   | 0,000250  | 548194  | 2,39794 | 5,73893 |
| 250                   | 0,000250  | 519020  | 2,39794 | 5,71518 |
| 250                   | 0,000250  | 461082  | 2,39794 | 5,66378 |
| 300                   | 0,000300  | 91438   | 2,47712 | 4,96113 |
| 300                   | 0,000300  | 108870  | 2,47712 | 5,03691 |
| 300                   | 0,000300  | 115154  | 2,47712 | 5,06128 |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **213** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1914,5Nf^{-0,159}$$

Gráfico 19. Tendencia de la ley de fatiga (GCR) IDU-1397-17



Nota: Con los datos de la Tabla 58 se obtuvo esta grafica.

### Adherencia

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas (TSR) bajo la norma I.N.V.E-725-13.

Tabla 59. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para GCR, IDU-1397-17

| ADHERENCIA GCR 1397-17                                   |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 72,1        | 101           | 767              | 657,7                          | 95,4                           |
|                                                          | 2             | 71,8        | 101           | 744              | 640,5                          | 92,9                           |
|                                                          | 3             | 71,9        | 101           | 757              | 650,9                          | 94,4                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 649,7                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 94,2                           |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 4             | 71,8        | 101           | 612              | 526,8                          | 76,4                           |
|                                                          | 5             | 72,3        | 101           | 595              | 508,8                          | 73,8                           |
|                                                          | 6             | 70,8        | 101           | 608              | 530,9                          | 77,0                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 522,2                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 75,7                           |                                |

Nota: Datos obtenidos al realizar el ensayo según las normas establecidas.

Tabla 60. Relación de resistencia a la tensión

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| RELACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (%) GCR | 80,4% |
|----------------------------------------------|-------|

Nota: Este resultado se obtiene del porcentaje obtenido en la relación del RTH y el RTS en Kpa.

### Ahuellamiento o deformación plástica

Este laboratorio se realizó mediante el método la pista de ensayo de laboratorio bajo la norma INVE 756/13.

Tabla 61. Resultados ensayo de ahuellamiento para GCR, IDU-1397-17

| DEFORMACIÓN PLASTICA GCR 1397-17 |                     |           |                |           |                     |           |                |           |                     |           |                |                          |              |
|----------------------------------|---------------------|-----------|----------------|-----------|---------------------|-----------|----------------|-----------|---------------------|-----------|----------------|--------------------------|--------------|
| PERIODO                          | PROBETA 1           |           |                | PERIODO   | PROBETA 2           |           |                | PERIODO   | PROBETA 3           |           |                | PROMEDIO                 | PROMEDIO DEF |
|                                  | Deformación<br>(mm) | Velocidad |                |           | Deformación<br>(mm) | Velocidad |                |           | Deformación<br>(mm) | Velocidad |                | PROBETAS                 |              |
|                                  |                     | (mm/min)  | ( $\mu$ m/min) |           |                     | (mm/min)  | ( $\mu$ m/min) |           |                     | (mm/min)  | ( $\mu$ m/min) | Velocidad ( $\mu$ m/min) |              |
| 30 - 45                          | 0,102               | 0,0068    | 6,8            | 30 - 45   | 0,121               | 0,0081    | 8,07           | 30 - 45   | 0,175               | 0,01167   | 11,67          | 8,8                      | 1580         |
| 75 - 90                          | 0,038               | 0,0025    | 2,53           | 75 - 90   | 0,068               | 0,0045    | 4,53           | 75 - 90   | 0,126               | 0,0084    | 8,4            | 5,2                      | 1660         |
| 105 - 120                        | 0,029               | 0,0019    | 1,93           | 105 - 120 | 0,052               | 0,0035    | 3,47           | 105 - 120 | 0,080               | 0,0053    | 5,33           | 3,6                      | 1660         |
|                                  |                     |           |                |           |                     |           |                |           |                     |           |                |                          | 1633         |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Tabla 62. Velocidad en µm/min obtenida según especificación.

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (µm/min) | Velocidad (µm/min)       |
| 3,6                | 15,0                     |

### Módulos

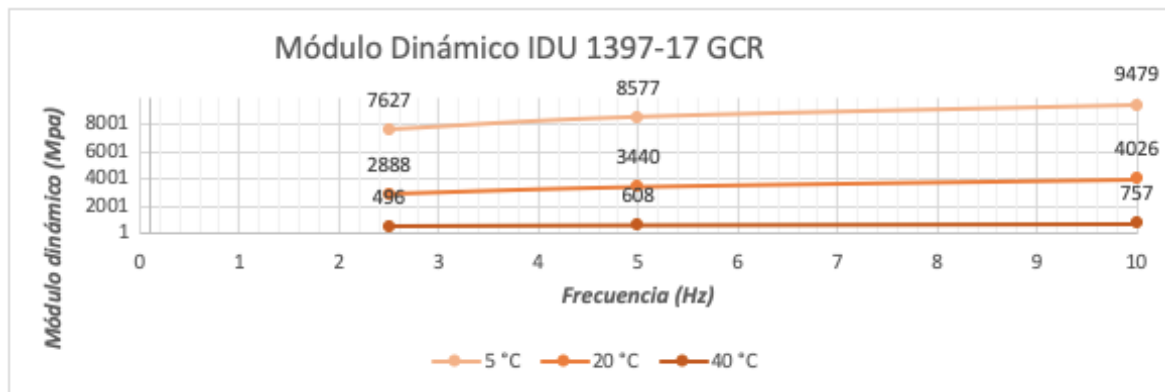
Este laboratorio se realizó mediante determinación de módulo dinámico bajo la norma AASHTO R-30.

Tabla 63. Resultados ensayo de módulo dinámico para GCR, IDU-1397-17

| MODULO DINAMICO IDU 1397-17 GCR |                  |                       |
|---------------------------------|------------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                      | Frecuencia (Hz)  | Módulo Dinámico       |
| 5                               | 2,5              | 7627                  |
|                                 | 5                | 8577                  |
|                                 | 10               | 9479                  |
| 20                              | 2,5              | 2888                  |
|                                 | 5                | 3440                  |
|                                 | 10               | 4026                  |
| 40                              | 2,5              | 496                   |
|                                 | 5                | 608                   |
|                                 | 10               | 757                   |
| Frecuencia (Hz)                 | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 2,5                             | 5                | 7627                  |
|                                 | 20               | 2888                  |
|                                 | 40               | 496                   |
| 5                               | 5                | 8577                  |
|                                 | 20               | 3440                  |
|                                 | 40               | 608                   |
| 10                              | 5                | 9479                  |
|                                 | 20               | 4026                  |
|                                 | 40               | 757                   |

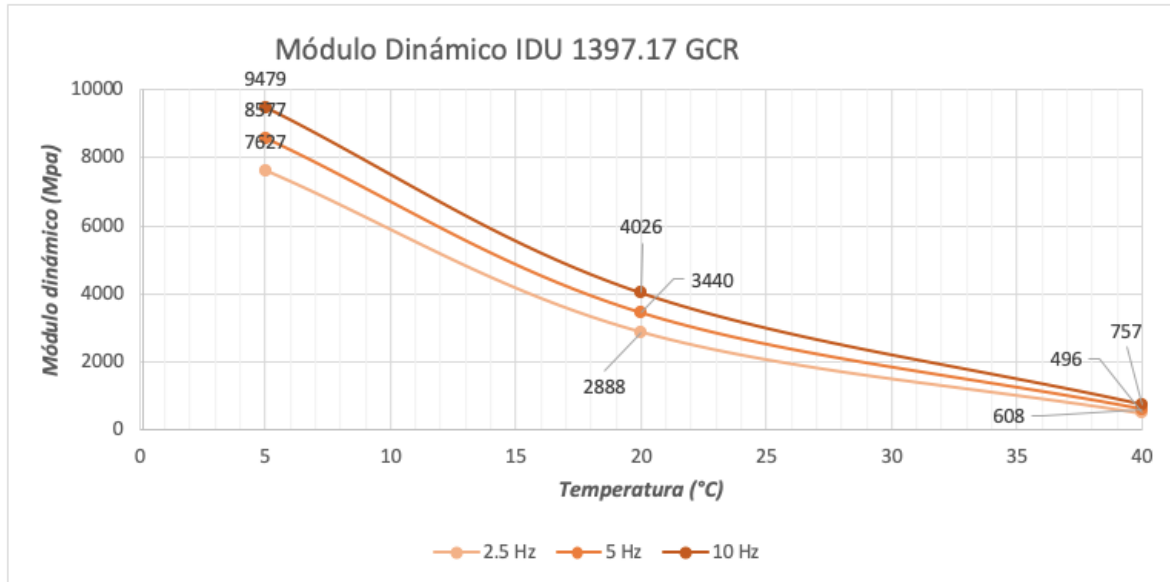
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 20. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (GCR) IDU-1397-17



Nota: Modulo dinámico con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 21. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (GCR) IDU-1397-17



*Nota: Modulo dinámico con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.*

### Mezcla asfáltica MD12

A este tipo de mezcla se le realizaron los laboratorios de Fatiga, adherencia, ahuellamiento y modulo, también cuenta con las siguientes especificaciones que se verificaron mediante laboratorios básicos del pavimento, la calidad de los materiales con los que se hará la mezcla asfáltica, con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas establecidas para la ciudad, en este caso Bogotá.

Tabla 64. Granulometría correspondiente para MD12, IDU-1397-17

| MD12 - IDU-1397-17 |                  |                |
|--------------------|------------------|----------------|
|                    | TIPO DE AGREGADO | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA      | Triturado 3/4"   | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena triturada  | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena Lavada     | IDU-ET-510-11  |

*Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.*

Tabla 65. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12, IDU-1397-17

| MD12 - IDU-1397-17 |                                            |             |           |            |
|--------------------|--------------------------------------------|-------------|-----------|------------|
|                    | ENSAYO                                     | NORMA       | RESULTADO | PARÁMETRO  |
| ASFALTO            | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, (mm/10)    | I.N.V.E-706 | 65        | 60 - 70    |
|                    | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712 | 50,2      | 45 - 55 °C |
|                    | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa - s)         | I.N.V.E-717 | 2280      | 1500-3000  |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones las cuales están dentro de los parámetros dados.

Tabla 66. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD12, IDU-1397-17

| MD12 - IDU-1397-17                   |                                            |                    |           |             |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|-----------|-------------|
|                                      | ENSAYO                                     | NORMA              | RESULTADO | PARÁMETRO   |
| DISEÑO<br>PRELIMINAR DE<br>LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13 | 6%        | -           |
|                                      | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13     | 75        | 75          |
|                                      | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13     | 1414      | ≥900Kg      |
|                                      | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13     | 2,8       | 2,0 a 3,5mm |
|                                      | Vacíos con aire Va, (%)                    | E-736/799-13 Manua | 5%        | 4,0 a 6,0%  |
|                                      | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%) | I.N.V.E-799-13     | 17%       | ≥14         |
|                                      |                                            | Manual MS-2        |           |             |
|                                      | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13     | 68%       | 65 a 75%    |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones por parte del diseño preliminar de la mezcla.

### Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de Flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 67. Resultados ensayo de fatiga para MD12, IDU-1397-17

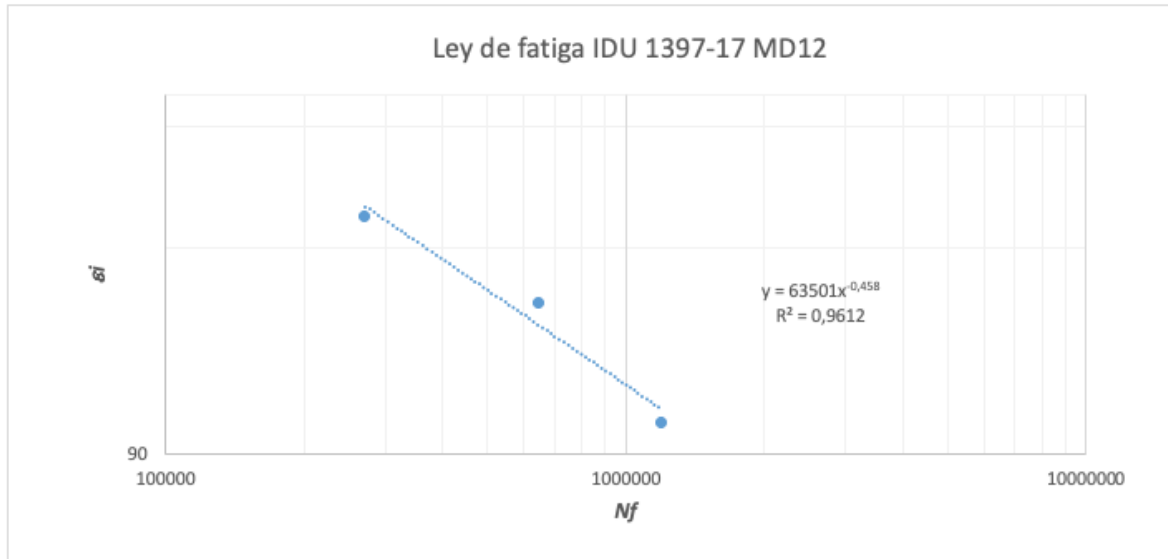
| FATIGA MD12 IDU 1397 |          |         |         |         |
|----------------------|----------|---------|---------|---------|
| e (∝def)             | e (def)  | Nf      | Ln e    | Ln Nf   |
| 100                  | 0,000100 | 1196108 | 2,00000 | 6,07777 |
| 150                  | 0,000150 | 648456  | 2,17609 | 5,81188 |
| 200                  | 0,000200 | 271236  | 2,30103 | 5,43335 |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **114** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 63501Nf^{-0,458}$$

Gráfico 22. Deformación vs Numero de repeticiones (MD12) IDU-1397-17



Nota: Con los datos de la Tabla 67 se obtuvo esta grafica.

### Adherencia

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas (TSR) bajo la norma I.N.V.E-725-13.

Tabla 68. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD12, IDU-1397-17

| ADHERENCIA MD12 1397-17                                  |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 2             | 65,7        | 101,2         | 833,3            | 782,5                          | 113,5                          |
|                                                          | 4             | 66,2        | 101,2         | 820              | 765,2                          | 111,0                          |
|                                                          | 6             | 66,5        | 101,1         | 766,2            | 711,5                          | 103,2                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 753,1                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 109,2                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 1             | 65,9        | 101,2         | 691,16           | 645,7                          | 93,7                           |
|                                                          | 3             | 66,3        | 101,3         | 707              | 653,3                          | 94,8                           |
|                                                          | 5             | 66,2        | 101,2         | 722,26           | 671                            | 97,3                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 656,7                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 95,2                           |                                |

Nota: Datos obtenidos al realizar el ensayo según las normas establecidas.



Tabla 69. Relación de resistencia a la tensión

|                                                      |       |
|------------------------------------------------------|-------|
| <b>RELACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (%) MD12</b> | 87,2% |
|------------------------------------------------------|-------|

Nota: Este resultado se obtiene del porcentaje obtenido en la relación del RTH y el RTS en Kpa.

### Ahuellamiento o deformación plástica

Este laboratorio se realizó mediante el método la pista de ensayo de laboratorio bajo la norma INVE 756/13.

Tabla 70. Resultados ensayo de ahuellamiento para MD12, IDU-1397-17

| DEFORMACIÓN PLASTICA MD12 1397-17 |                  |                    |                    |              |                  |                    |                    |                    |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PROBETA 1                         |                  |                    |                    | PROBETA 2    |                  |                    |                    | PROMEDIO DEF (αm)  |
| Tiempo (min)                      | Deformación (mm) | Deformación (αm)   | Diferencia (mm)    | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (αm)   | Diferencia (mm)    |                    |
| 0                                 | 0,000            | 0                  | 0,000              | 0            | 0,000            | 0                  | 0,000              | 0                  |
| 1                                 | 0,290            | 290                | 0,290              | 1            | 0,310            | 310                | 0,310              | 300                |
| 3                                 | 0,740            | 740                | 0,450              | 3            | 0,820            | 820                | 0,510              | 780                |
| 5                                 | 0,920            | 920                | 0,180              | 5            | 1,040            | 1040               | 0,220              | 980                |
| 10                                | 1,200            | 1200               | 0,280              | 10           | 1,350            | 1350               | 0,310              | 1275               |
| 15                                | 1,390            | 1390               | 0,190              | 15           | 1,560            | 1560               | 0,210              | 1475               |
| 20                                | 1,540            | 1540               | 0,150              | 20           | 1,720            | 1720               | 0,160              | 1630               |
| 25                                | 1,670            | 1670               | 0,130              | 25           | 1,800            | 1800               | 0,080              | 1735               |
| 30                                | 1,770            | 1770               | 0,100              | 30           | 1,880            | 1880               | 0,080              | 1825               |
| 35                                | 1,870            | 1870               | 0,100              | 35           | 1,990            | 1990               | 0,110              | 1930               |
| 40                                | 1,950            | 1950               | 0,080              | 40           | 2,070            | 2070               | 0,080              | 2010               |
| 45                                | 2,050            | 2050               | 0,100              | 45           | 2,170            | 2170               | 0,100              | 2110               |
| 60                                | 2,250            | 2250               | 0,200              | 60           | 2,410            | 2410               | 0,240              | 2330               |
| 75                                | 2,420            | 2420               | 0,170              | 75           | 2,630            | 2630               | 0,220              | 2525               |
| 90                                | 2,570            | 2570               | 0,150              | 90           | 2,800            | 2800               | 0,170              | 2685               |
| 105                               | 2,700            | 2700               | 0,130              | 105          | 2,970            | 2970               | 0,170              | 2835               |
| 120                               | 2,820            | 2820               | 0,120              | 120          | 3,100            | 3100               | 0,130              | 2960               |
| PROBETA 1                         |                  |                    |                    | PROBETA 2    |                  |                    |                    | PROMEDIO PROBETAS  |
| PERIODO                           | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (αm/min) | PERIODO      | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (αm/min) | Velocidad (αm/min) |
| 30 - 45                           | 0,280            | 0,0187             | 18,7               | 30 - 45      | 0,290            | 0,0193             | 19,3               | 19,0               |
| 75 - 90                           | 0,150            | 0,0100             | 10,0               | 75 - 90      | 0,170            | 0,0113             | 11,3               | 10,7               |
| 105 - 120                         | 0,120            | 0,0080             | 8,0                | 105 - 120    | 0,130            | 0,0087             | 8,7                | 8,3                |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Tabla 71. Velocidad en μm/min obtenida según especificación.

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (αm/min) | Velocidad (αm/min)       |
| 8,3                | 15,0                     |

### Módulo de rigidez

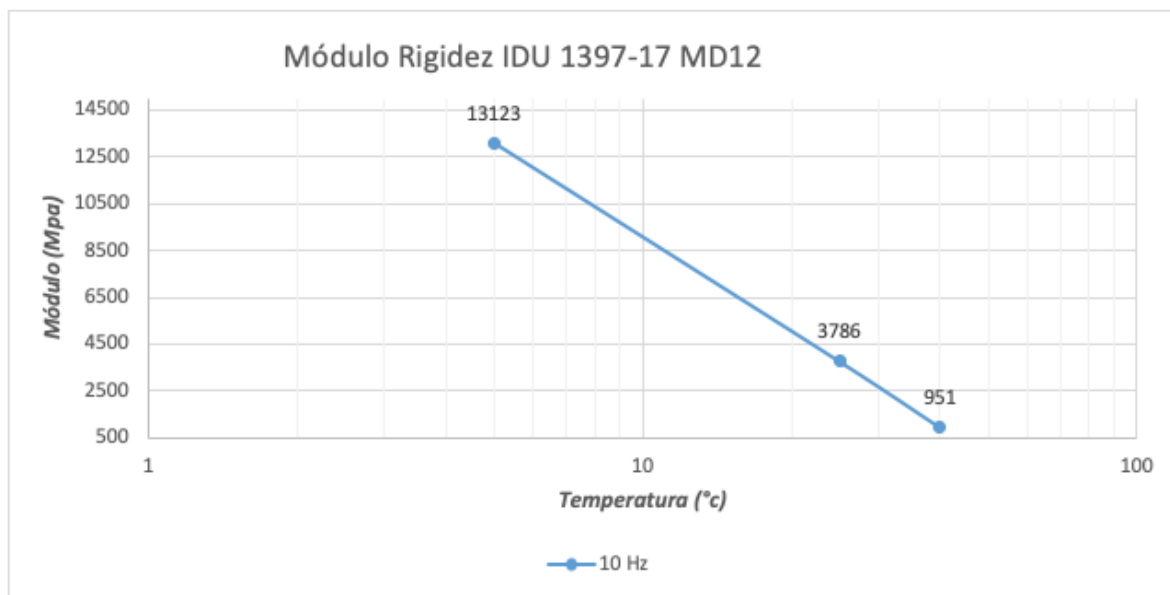
Este laboratorio se realizó mediante el método flexión en tres puntos sobre probetas prismáticas (3PRB-PR) bajo la norma UNE-EN 12697-26.

Tabla 72. Resultados ensayo de módulo de rigidez para (MD12) IDU-1397-17

| MODULO RIGIDEZ IDU 1397-17 MD12 |            |                       |
|---------------------------------|------------|-----------------------|
| Frecuencia (Hz)                 | Temp. (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10                              | 5          | 13123                 |
|                                 | 25         | 3786                  |
|                                 | 40         | 951                   |

Nota: Los datos se obtuvieron después de realizar el laboratorio a una frecuencia constante de 10 Hz.

Gráfico 23. Tendencia del módulo de rigidez (MD12) IDU-1397-17



### Mezcla asfáltica MD20

A esta mezcla se le realizaron los laboratorios de Fatiga, adherencia, ahuellamiento, modulo resiliente y modulo dinámico, también cuenta con las siguientes especificaciones que se verificaron mediante laboratorios básicos del pavimento, la calidad de los materiales con los que se hará la mezcla asfáltica, con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas establecidas para la ciudad, en este caso Bogotá.

Tabla 73. Granulometría correspondiente para MD20, IDU-1397-17

| MD20 - IDU-1397-17 |                  |                |
|--------------------|------------------|----------------|
|                    | TIPO DE AGREGADO | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA      | Triturado 1"     | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena triturada  | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena Lavada     | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.

Tabla 74. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1397-17

| MD20 - IDU-1397-17 |                                            |             |           |            |
|--------------------|--------------------------------------------|-------------|-----------|------------|
|                    | ENSAYO                                     | NORMA       | RESULTADO | PARÁMETRO  |
| ASFALTO            | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, (mm/10)    | I.N.V.E-706 | 65        | 60 - 70    |
|                    | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712 | 50,2      | 45 - 55 °C |
|                    | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa - s)         | I.N.V.E-717 | 2280      | 1500-3000  |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones las cuales están dentro de los parámetros dados.

Tabla 75. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1397-17

| MD20 - IDU-1397-17                   |                                            |                                   |           |             |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|
|                                      | ENSAYO                                     | NORMA                             | RESULTADO | PARÁMETRO   |
| DISEÑO<br>PRELIMINAR DE<br>LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13                | 5,7%      | -           |
|                                      | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13                    | 75        | 75          |
|                                      | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13                    | 1467      | ≥900Kg      |
|                                      | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13                    | 3,4       | 2,0 - 3,5mm |
|                                      | Vacios con aire Va, (%)                    | I.N.V.E-736/799-13 Manual<br>MS-2 | 4,9%      | 4,0 - 6,0%  |
|                                      | Vacios en los agregados minerales VAM, (%) | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2        | 15,3%     | ≥14         |
|                                      | Vacios llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13                    | 68,2%     | 65 a 75%    |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones por parte del diseño preliminar de la mezcla.

## Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de Tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO E.

Tabla 76. Resultados ensayo de fatiga para MD20, IDU-1397-17

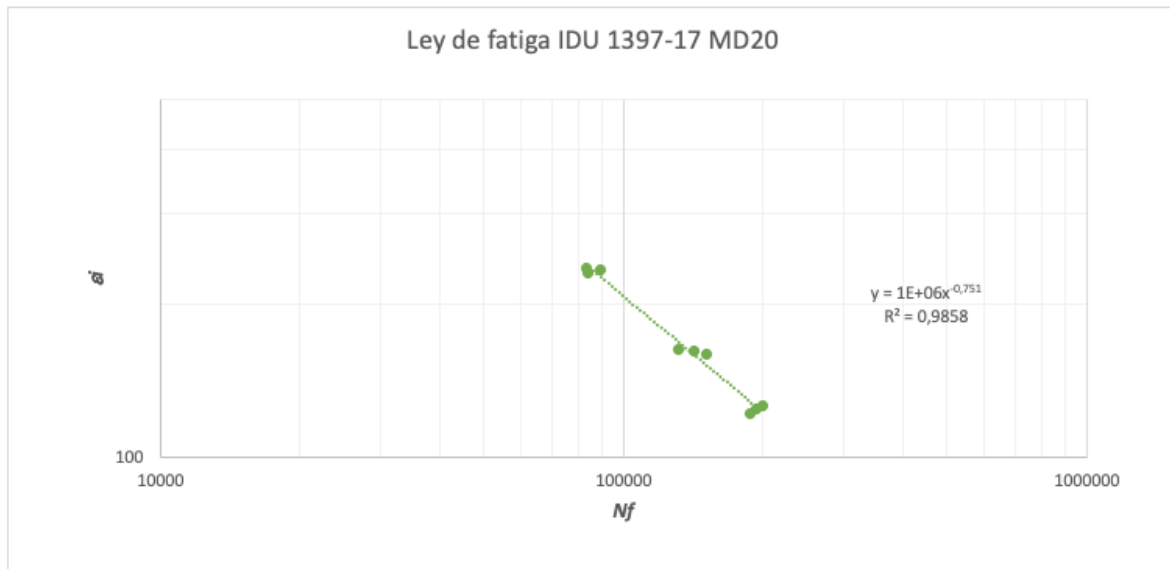
| FATIGA MD20 IDU-1397 |           |        |         |         |
|----------------------|-----------|--------|---------|---------|
| $e (\propto def)$    | $e (def)$ | $Nf$   | $Ln e$  | $Ln Nf$ |
| 122                  | 0,000122  | 188300 | 2,08636 | 5,27485 |
| 125                  | 0,000125  | 193800 | 2,09691 | 5,28735 |
| 126                  | 0,000126  | 199420 | 2,10037 | 5,29977 |
| 161                  | 0,000161  | 142200 | 2,20683 | 5,15290 |
| 159                  | 0,000159  | 151200 | 2,20140 | 5,17955 |
| 163                  | 0,000163  | 131900 | 2,21219 | 5,12024 |
| 230                  | 0,000230  | 84120  | 2,36173 | 4,92490 |
| 232                  | 0,000232  | 89550  | 2,36549 | 4,95207 |
| 235                  | 0,000235  | 82900  | 2,37107 | 4,91855 |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **37** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1173793Nf^{-0,751}$$

Gráfico 24. Tendencia de la ley de fatiga (MD20) IDU-1397-17



Nota: Con los datos de la Tabla 76 se obtuvo esta grafica.

### Adherencia

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas (TSR) bajo la norma I.N.V.E-725-13.

Tabla 77. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD20, IDU-1397-17

| ADHERENCIA MD20 1397-17                                  |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 66,5        | 101,2         | 729,2            | 676,5                          | 98,1                           |
|                                                          | 2             | 65,8        | 101,3         | 868,3            | 813,3                          | 118,0                          |
|                                                          | 3             | 65,7        | 101,3         | 831,3            | 779,8                          | 113,1                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 756,5                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 109,7                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 4             | 65,5        | 101,3         | 604,2            | 566,1                          | 82,1                           |
|                                                          | 5             | 65,8        | 101,3         | 769,2            | 720,5                          | 104,5                          |
|                                                          | 6             | 65,9        | 101,1         | 721,25           | 675,8                          | 98,0                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 654,1                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 94,9                           |                                |

Nota: Datos obtenidos al realizar el ensayo según las normas establecidas.

Tabla 78. Relación de resistencia a la tensión

|                                               |       |
|-----------------------------------------------|-------|
| RELACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (%) MD20 | 86,5% |
|-----------------------------------------------|-------|

Nota: Este resultado se obtiene del porcentaje obtenido en la relación del RTH y el RTS en Kpa.

### Ahuellamiento o deformación plástica

Este laboratorio se realizó mediante el método la pista de ensayo de laboratorio bajo la norma INVE 756/13.

Tabla 79. Resultados ensayo de ahuellamiento para MD20, IDU-1397-17

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD20 1397-17 |                  |                    |                    |              |                  |                    |                    |              |                  |                    |                    |                    |
|-----------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| PROBETA 1                         |                  |                    |                    | PROBETA 2    |                  |                    |                    | PROBETA 3    |                  |                    |                    | PROMEDIO DEF (αm)  |
| Tiempo (min)                      | Deformación (mm) | Deformación (αm)   | Diferencia (mm)    | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (αm)   | Diferencia (mm)    | Tiempo (min) | Deformación (mm) | Deformación (αm)   | Diferencia (mm)    |                    |
| 0                                 | 0,248            | 248                | 0,000              | 0            | 0,215            | 215                | 0,000              | 0            | 0,310            | 310                | 0,000              | 258                |
| 1                                 | 0,698            | 698                | 0,450              | 1            | 0,718            | 718                | 0,503              | 1            | 0,708            | 708                | 0,398              | 708                |
| 3                                 | 0,805            | 805                | 0,107              | 3            | 0,836            | 836                | 0,118              | 3            | 0,821            | 821                | 0,113              | 821                |
| 5                                 | 0,916            | 916                | 0,111              | 5            | 0,952            | 952                | 0,116              | 5            | 0,934            | 934                | 0,113              | 934                |
| 10                                | 1,092            | 1092               | 0,176              | 10           | 1,120            | 1120               | 0,168              | 10           | 1,106            | 1106               | 0,172              | 1106               |
| 15                                | 1,101            | 1101               | 0,009              | 15           | 1,205            | 1205               | 0,085              | 15           | 1,153            | 1153               | 0,047              | 1153               |
| 20                                | 1,167            | 1167               | 0,066              | 20           | 1,219            | 1219               | 0,014              | 20           | 1,190            | 1190               | 0,037              | 1192               |
| 25                                | 1,215            | 1215               | 0,048              | 25           | 1,240            | 1240               | 0,021              | 25           | 1,228            | 1228               | 0,038              | 1228               |
| 30                                | 1,246            | 1246               | 0,031              | 30           | 1,251            | 1251               | 0,011              | 30           | 1,248            | 1248               | 0,020              | 1248               |
| 35                                | 1,266            | 1266               | 0,020              | 35           | 1,274            | 1274               | 0,023              | 35           | 1,270            | 1270               | 0,022              | 1270               |
| 40                                | 1,271            | 1271               | 0,005              | 40           | 1,281            | 1281               | 0,007              | 40           | 1,276            | 1276               | 0,006              | 1276               |
| 45                                | 1,279            | 1279               | 0,008              | 45           | 1,290            | 1290               | 0,009              | 45           | 1,284            | 1284               | 0,008              | 1284               |
| 60                                | 1,285            | 1285               | 0,006              | 60           | 1,309            | 1309               | 0,019              | 60           | 1,297            | 1297               | 0,013              | 1297               |
| 75                                | 1,296            | 1296               | 0,011              | 75           | 1,319            | 1319               | 0,010              | 75           | 1,307            | 1307               | 0,010              | 1307               |
| 90                                | 1,302            | 1302               | 0,006              | 90           | 1,347            | 1347               | 0,028              | 90           | 1,324            | 1324               | 0,017              | 1324               |
| 105                               | 1,333            | 1333               | 0,031              | 105          | 1,434            | 1434               | 0,087              | 105          | 1,383            | 1383               | 0,059              | 1383               |
| 120                               | 1,384            | 1384               | 0,051              | 120          | 1,454            | 1454               | 0,020              | 120          | 1,417            | 1417               | 0,034              | 1418               |
| PROBETA 1                         |                  |                    |                    | PROBETA 2    |                  |                    |                    | PROBETA 3    |                  |                    |                    | PROMEDIO PROBETAS  |
| PERIODO                           | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (αm/min) | PERIODO      | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (αm/min) | PERIODO      | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad (αm/min) | Velocidad (αm/min) |
| 30 - 45                           | 0,033            | 0,0022             | 2,2                | 30 - 45      | 0,039            | 0,0026             | 2,6                | 30 - 45      | 0,036            | 0,0024             | 2,4                | 2,4                |
| 75 - 90                           | 0,006            | 0,0004             | 0,4                | 75 - 90      | 0,028            | 0,0019             | 1,9                | 75 - 90      | 0,017            | 0,0011             | 1,1                | 1,1                |
| 105 - 120                         | 0,051            | 0,0034             | 3,4                | 105 - 120    | 0,020            | 0,0013             | 1,3                | 105 - 120    | 0,034            | 0,0023             | 2,3                | 2,3                |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Tabla 80. Velocidad en μm/min obtenida según especificación.

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (αm/min) | Velocidad (αm/min)       |
| 2,3                | 15,0                     |

### Modulo dinámico

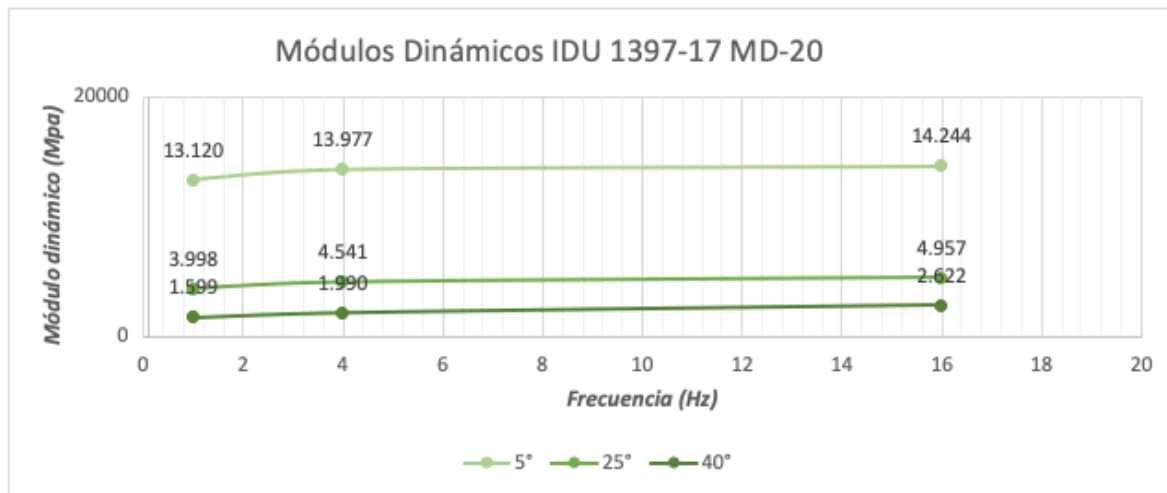
Este laboratorio se realizó mediante el método modulo dinámico de mezclas asfálticas bajo la norma INV E 754-07.

Tabla 81. Resultados ensayo de modulo dinámico para MD20, IDU-1397-17

| MODULO DINAMICO IDU 1397-17 MD-20 |                  |                                       |                       |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                        | Frecuencia (Hz)  | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                                | 1                | 133782                                | 13119,7               |
|                                   | 4                | 142519                                | 13976,6               |
|                                   | 16               | 145245                                | 14243,9               |
| 25°                               | 1                | 40768                                 | 3998,0                |
|                                   | 4                | 46309                                 | 4541,4                |
|                                   | 16               | 50549                                 | 4957,2                |
| 40°                               | 1                | 16307                                 | 1599,2                |
|                                   | 4                | 20293                                 | 1990,1                |
|                                   | 16               | 26740                                 | 2622,3                |
| Frecuencia (Hz)                   | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1Hz                               | 5                | 133782                                | 13119,7               |
|                                   | 25               | 40768                                 | 3998,0                |
|                                   | 40               | 16307                                 | 1599,2                |
| 4Hz                               | 5                | 142519                                | 13976,6               |
|                                   | 25               | 46309                                 | 4541,4                |
|                                   | 40               | 20293                                 | 1990,1                |
| 16Hz                              | 5                | 145245                                | 14243,9               |
|                                   | 25               | 50549                                 | 4957,2                |
|                                   | 40               | 26740                                 | 2622,3                |

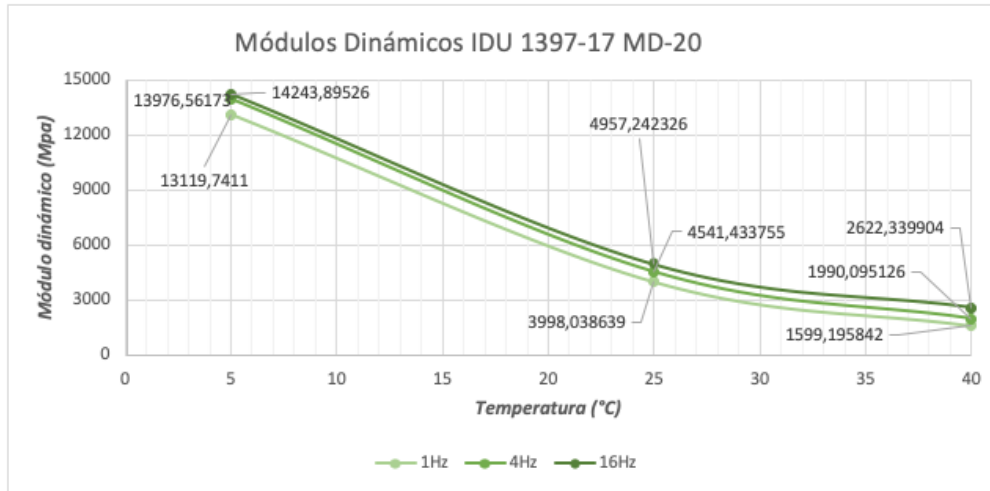
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 25. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1397-17



Nota: Modulo dinámico con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 26. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1397-17



Nota: Modulo dinámico con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### Modulo resiliente

Este laboratorio se realizó mediante el método ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNEN 12697 26 ANEXO C

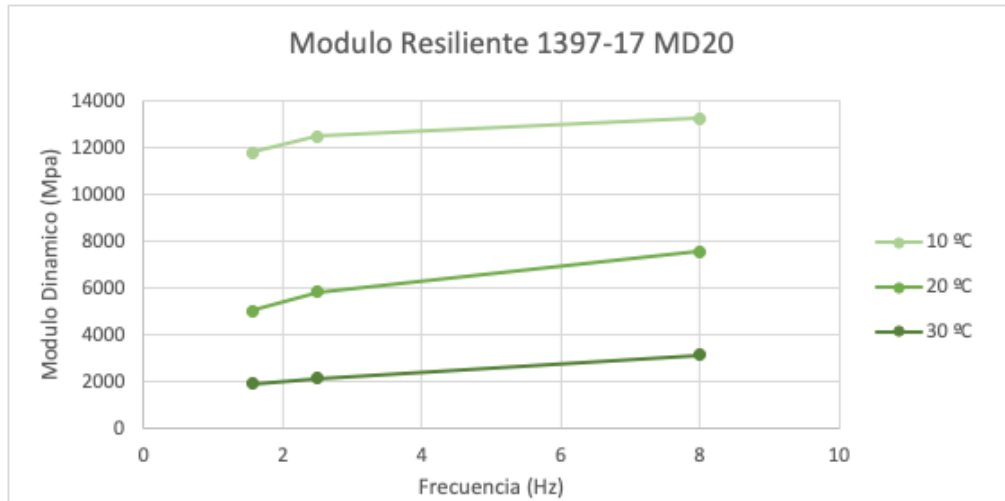
Tabla 82. Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1397-17

| MODULO RESILIENTE IDU 1397-17 MD20 |                 |                       |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                         | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10                                 | 8               | 13277                 |
|                                    | 2,5             | 12495                 |
|                                    | 1,56            | 11828                 |
| 20                                 | 8               | 7589                  |
|                                    | 2,5             | 5860                  |
|                                    | 1,56            | 5057                  |
| 30                                 | 8               | 3154                  |
|                                    | 2,5             | 2178                  |
|                                    | 1,56            | 1934                  |
| Frecuencia (Hz)                    | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1,56                               | 30              | 1934                  |
|                                    | 20              | 5057                  |
|                                    | 10              | 11828                 |
| 2,5                                | 30              | 2178                  |
|                                    | 20              | 5860                  |
|                                    | 10              | 12495                 |
| 8                                  | 30              | 3154                  |
|                                    | 20              | 7589                  |
|                                    | 10              | 13277                 |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

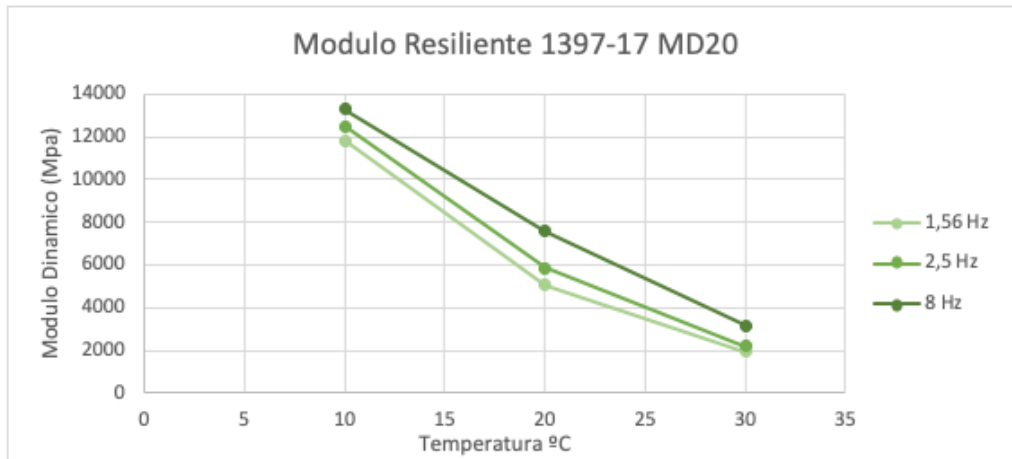


Gráfico 27. Tendencia del módulo resiliente, módulo vs frecuencia (MD20) IDU-1397-17



Nota: Modulo resiliente con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 28. Tendencia del módulo resiliente modulo vs temperatura (MD20) IDU-1397-17



Nota: Modulo resiliente con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### IDU-1119-16

El contrato publico IDU-1119-16 tenía como objeto de contrato “Ejecutar a precios unitarios y a monto agotable, las obras y actividades necesarias para la conservación de la malla vial arterial troncal y la malla vial que soporta las rutas del sistema integrado de transporte público- SITP, en la ciudad de Bogotá D.C.” y para esto diseñaron tres tipos de mezclas.

### Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR)

A esta mezcla se le realizaron los laboratorios de Fatiga, adherencia, ahuellamiento y modulo, también cuenta con las siguientes especificaciones que se verificaron mediante laboratorios básicos del pavimento, la calidad de los materiales con los que se hará la mezcla asfáltica, con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas establecidas para la ciudad, en este caso Bogotá.

Tabla 83. Granulometría correspondiente para GCR, IDU-1119-16

| GCR - IDU-1119-16 |                      |                |
|-------------------|----------------------|----------------|
|                   | TIPO DE AGREGADO     | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA     | Arena triturada      | IDU-ET-510-11  |
|                   | Triturado grava 1/2" | IDU-ET-510-11  |
|                   | Arena garbanzal      | IDU-ET-510-11  |
|                   | Grava 1"             | IDU-ET-510-11  |

*Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.*

Tabla 84. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1119-16

| GCR - IDU-1119-16 |                                            |                |           |           |
|-------------------|--------------------------------------------|----------------|-----------|-----------|
|                   | ENSAYO                                     | NORMA          | RESULTADO | PARÁMETRO |
| ASFALTO           | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, (mm/10)    | I.N.V.E-706    | 67        | 40-70     |
|                   | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712    | 62,6      | ≥ 52      |
|                   | Viscosidad Brookfield a 163°C, (Pa-s)      | ASTM D 4402-87 | 3         | 1,5 - 3   |

*Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones las cuales están dentro o superaron los parámetros dados.*

Tabla 85. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR, IDU-1119-16

| GCR - IDU-1119-16                    |                                                   |                                   |           |            |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|------------|
|                                      | ENSAYO                                            | NORMA                             | RESULTADO | PARÁMETRO  |
| DISEÑO<br>PRELIMINAR DE LA<br>MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON GCR (%) | I.N.V.E-748/732-13                | 8,2       | 6,0 - 9,0  |
|                                      | Compactación (golpes/cara)                        | I.N.V.E-748-13                    | 75        | -          |
|                                      | Estabilidad mínima (kg/N)                         | I.N.V.E-748-13                    | 1588      | ≥          |
|                                      | Flujo (mm)                                        | I.N.V.E-748-13                    | 4,4       | 2,5 - 5,5  |
|                                      | Vacíos con aire Va, (%)                           | I.N.V.E-736/799-13 Manual<br>MS-2 | 4,1       | 3,0 a 5,0% |
|                                      | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%)        | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2        | 16,7      | ≥ 14       |
|                                      | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)                 | I.N.V.E-799-13                    | 75        | -          |
|                                      |                                                   |                                   |           |            |

*Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones por parte del diseño preliminar de la mezcla.*

### Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de flexión en cuatro puntos sobre probetas prismáticas con deformación constante bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO D.

Tabla 86. Resultados ensayo de fatiga para GCR, IDU-1119-16

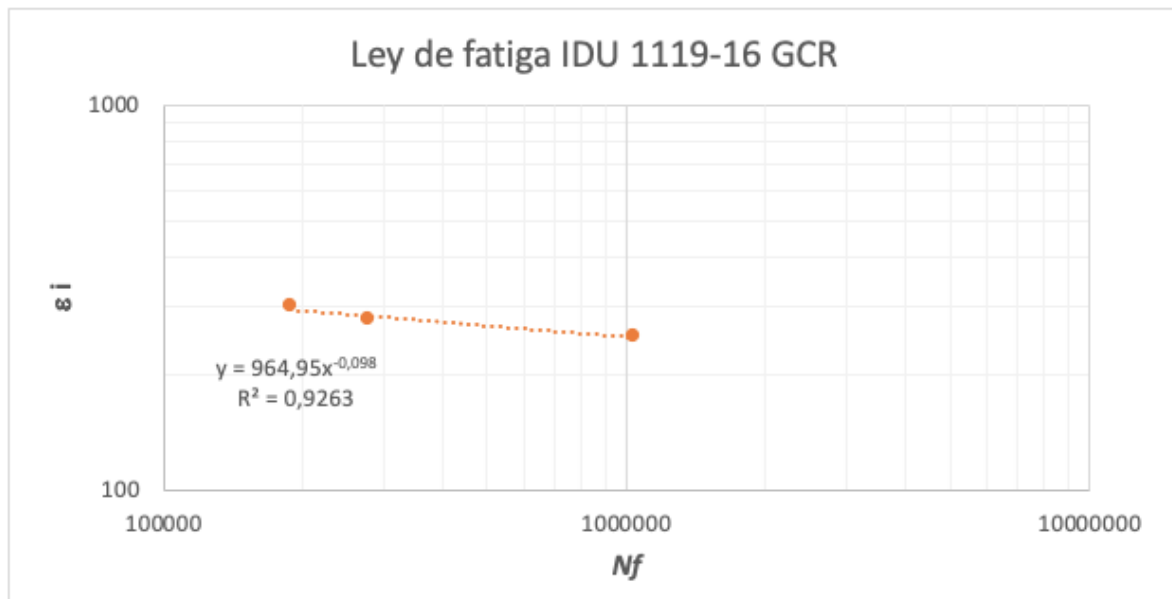
| FATIGA GCR IDU - 1119-16 |           |         |         |         |
|--------------------------|-----------|---------|---------|---------|
| $e (\propto def)$        | $e (def)$ | $Nf$    | $Ln e$  | $Ln Nf$ |
| 250                      | 0,000250  | 1041055 | 2,39794 | 6,01747 |
| 275                      | 0,000275  | 279095  | 2,43933 | 5,44575 |
| 275                      | 0,000275  |         | 2,43933 |         |
| 300                      | 0,000300  | 187983  | 2,47712 | 5,27412 |
| 300                      | 0,000300  |         | 2,47712 |         |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **249** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 964,95Nf^{-0,098}$$

Gráfico 29. Tendencia de la ley de fatiga (GCR) IDU-1119-16



Nota: Con los datos de la Tabla 86 se obtuvo esta grafica.

### Adherencia

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas (TSR) bajo la norma I.N.V.E-725-07.

Tabla 87. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para GCR, IDU-1119-16

| ADHERENCIA GCR 1119-16                                   |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 3             | 67,8        | 99,9          | 644              | 593,6                          | 86,1                           |
|                                                          | 4             | 67,6        | 99,9          | 743              | 686,7                          | 99,6                           |
|                                                          | 6             | 67,5        | 100           | 766              | 708,8                          | 102,8                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 663,0                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 96,2                           |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 1             | 67,9        | 100           | 568              | 521,9                          | 75,7                           |
|                                                          | 2             | 68,1        | 100           | 633              | 580,5                          | 84,2                           |
|                                                          | 5             | 67,6        | 99,9          | 736              | 680,5                          | 98,7                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 594,3                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 86,2                           |                                |

Nota: Datos obtenidos al realizar el ensayo según las normas establecidas.

Tabla 88. Relación de resistencia a la tensión

|                                              |       |
|----------------------------------------------|-------|
| RELACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (%) GCR | 89,6% |
|----------------------------------------------|-------|

Nota: Este resultado se obtiene del porcentaje obtenido en la relación del RTH y el RTS en Kpa.

### Ahuellamiento o deformación plástica

Este laboratorio se realizó mediante el método la pista de ensayo de laboratorio bajo la norma INVE 756/13.

Tabla 89. Resultados ensayo de ahuellamiento para GCR, IDU-1119-16

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA GCR 1119-16 |                     |                       |                   |           |                     |                       |                   |           |                     |                       |                   |                                |                               |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------|---------------------|-----------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| PERIODO                          | PROBETA 1           |                       |                   | PERIODO   | PROBETA 2           |                       |                   | PERIODO   | PROBETA 3           |                       |                   | PROMEDIO<br>PROBETAS           | PROMEDIO<br>DEF ( $\alpha$ m) |
|                                  | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | ( $\alpha$ m/min) |           | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | ( $\alpha$ m/min) |           | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | ( $\alpha$ m/min) | Velocidad<br>( $\alpha$ m/min) |                               |
| 30 - 45                          | 0,157               | 0,0105                | 10,47             | 30 - 45   | 0,139               | 0,0093                | 9,27              | 30 - 45   | 0,245               | 0,01630               | 16,30             | 12,0                           | 2580                          |
| 75 - 90                          | 0,072               | 0,0048                | 4,77              | 75 - 90   | 0,054               | 0,0036                | 3,57              | 75 - 90   | 0,129               | 0,0086                | 8,6               | 5,6                            | 3460                          |
| 105 - 120                        | 0,054               | 0,0036                | 3,6               | 105 - 120 | 0,036               | 0,0024                | 2,40              | 105 - 120 | 0,093               | 0,0062                | 6,2               | 4,1                            | 4340                          |
|                                  |                     |                       |                   |           |                     |                       |                   |           |                     |                       |                   |                                | 3460,00                       |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Tabla 90. Velocidad en  $\mu$ m/min obtenida según especificación.

| PROMEDIO PROBETAS           | ESPECIFICACIÓN MENOR<br>QUE |
|-----------------------------|-----------------------------|
| Velocidad ( $\alpha$ m/min) | Velocidad ( $\alpha$ m/min) |
| 7,2                         | 15,0                        |

### Módulos

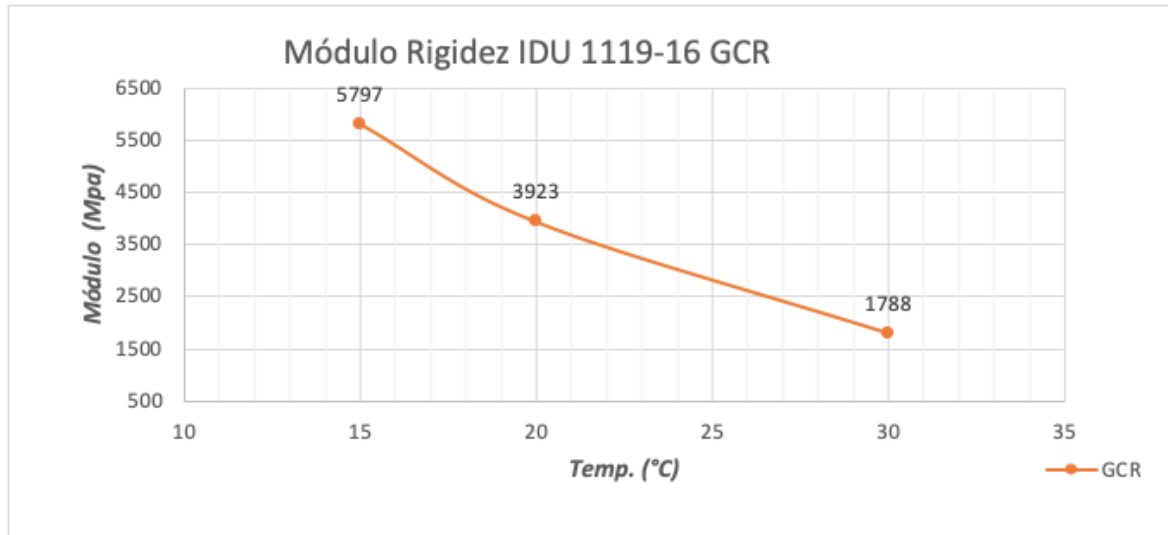
Este laboratorio se realizó mediante Ensayo de tensión indirecta para determinar el módulo resiliente bajo la norma (EN 12697-26 ANEXO B).

Tabla 91. Resultados ensayo de módulo de rigidez para GCR, IDU-1119-16

| MODULO RIGIDEZ IDU 1119-16 GCR |            |                          |
|--------------------------------|------------|--------------------------|
| Frecuencia (Hz)                | Temp. (°C) | Módulo Dinámico<br>(Mpa) |
| 10                             | 15         | 5797                     |
|                                | 20         | 3923                     |
|                                | 30         | 1788                     |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 30. Tendencia del módulo de rigidez modulo vs temperatura (GCR) IDU-1119-16



*Nota: Modulo de rigidez con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.*

### Mezcla asfáltica MD12

Para esta mezcla se encontraron los resultados de los laboratorios, ley de fatiga, módulo dinámico y módulo resiliente, también cuenta con la siguiente granulometría.

Tabla 92. Granulometría correspondiente para MD12, IDU-1119-16

| MD12 - IDU-1119-16 |                        |                |
|--------------------|------------------------|----------------|
|                    | TIPO DE AGREGADO       | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA      | Grava 3/4"             | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena de trituración   | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena de río Garbanzal | IDU-ET-510-11  |

*Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.*

### Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO E.

Tabla 93. Resultados ensayo de fatiga para MD12, IDU-1119-16

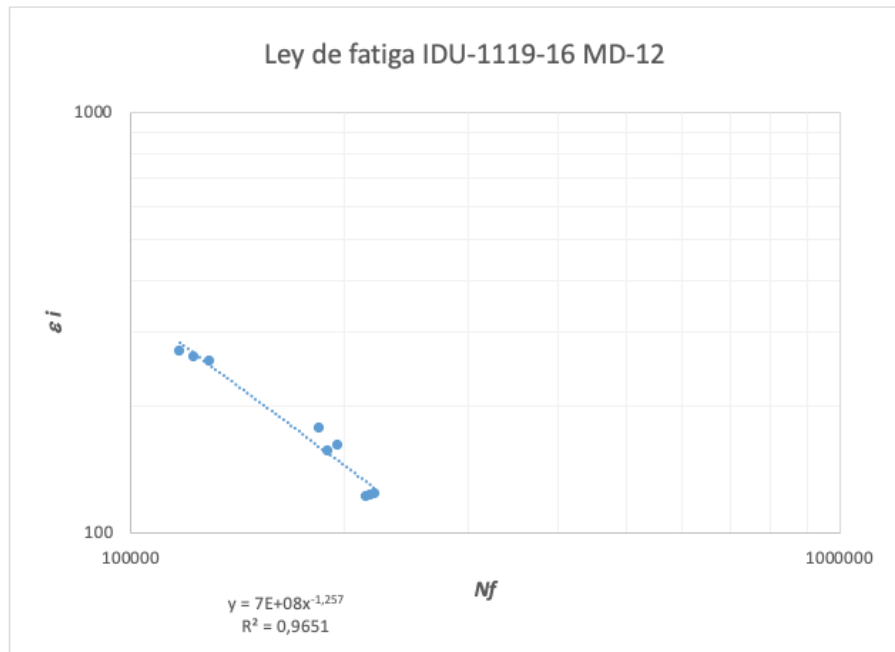
| FATIGA MD-12 IDU 1119-16 |           |        |         |         |
|--------------------------|-----------|--------|---------|---------|
| $e (\propto def)$        | $e (def)$ | $Nf$   | $Ln e$  | $Ln Nf$ |
| 122                      | 0,000122  | 215800 | 2,08636 | 5,33405 |
| 123                      | 0,000123  | 218100 | 2,08991 | 5,33866 |
| 124                      | 0,000124  | 222000 | 2,09342 | 5,34635 |
| 161                      | 0,000161  | 196700 | 2,20683 | 5,29380 |
| 156                      | 0,000156  | 190500 | 2,19312 | 5,27989 |
| 177                      | 0,000177  | 185450 | 2,24797 | 5,26823 |
| 270                      | 0,000270  | 117300 | 2,43136 | 5,06930 |
| 262                      | 0,000262  | 123400 | 2,41830 | 5,09132 |
| 256                      | 0,000256  | 129788 | 2,40824 | 5,11323 |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **19** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 7E + 08Nf^{-1,257}$$

Gráfico 31. Tendencia de la ley de fatiga (MD12) IDU-1119-16



Nota: Con los datos de la Tabla 92 se obtuvo esta grafica.

### Modulo dinámico

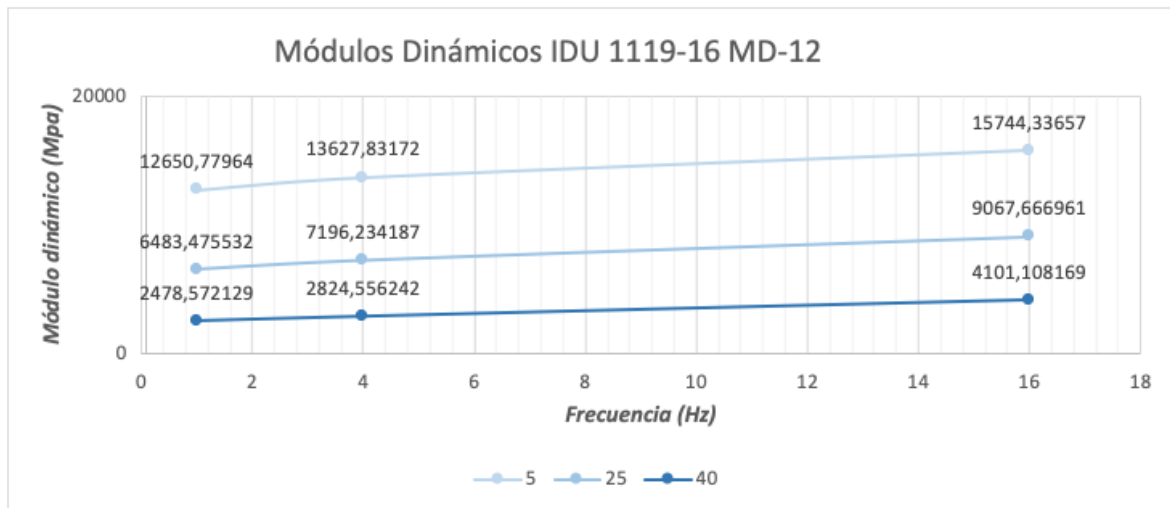
Este laboratorio se realizó mediante el método modulo dinámico de mezclas asfálticas bajo la norma INV E 754-07.

Tabla 94. Resultados ensayo de modulo dinámico para MD12, IDU-1119-16

| MODULO DINAMICO IDU 1119-16 MD-12 |                  |                                          |                          |
|-----------------------------------|------------------|------------------------------------------|--------------------------|
| Temp. (°C)                        | Frecuencia (Hz)  | Módulo Dinámico<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico<br>(Mpa) |
| 5                                 | 1                | 129000                                   | 12650,8                  |
|                                   | 4                | 138963                                   | 13627,8                  |
|                                   | 16               | 160545                                   | 15744,3                  |
| 25                                | 1                | 66112                                    | 6483,5                   |
|                                   | 4                | 73380                                    | 7196,2                   |
|                                   | 16               | 92463                                    | 9067,7                   |
| 40                                | 1                | 25274                                    | 2478,6                   |
|                                   | 4                | 28802                                    | 2824,6                   |
|                                   | 16               | 41819                                    | 4101,1                   |
| Frecuencia (Hz)                   | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico<br>(Mpa) |
| 1                                 | 5                | 129000                                   | 12650,8                  |
|                                   | 25               | 66112                                    | 6483,5                   |
|                                   | 40               | 25274                                    | 2478,6                   |
| 4                                 | 5                | 138963                                   | 13627,8                  |
|                                   | 25               | 73380                                    | 7196,2                   |
|                                   | 40               | 28802                                    | 2824,6                   |
| 16                                | 5                | 160545                                   | 15744,3                  |
|                                   | 25               | 92463                                    | 9067,7                   |
|                                   | 40               | 41819                                    | 4101,1                   |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

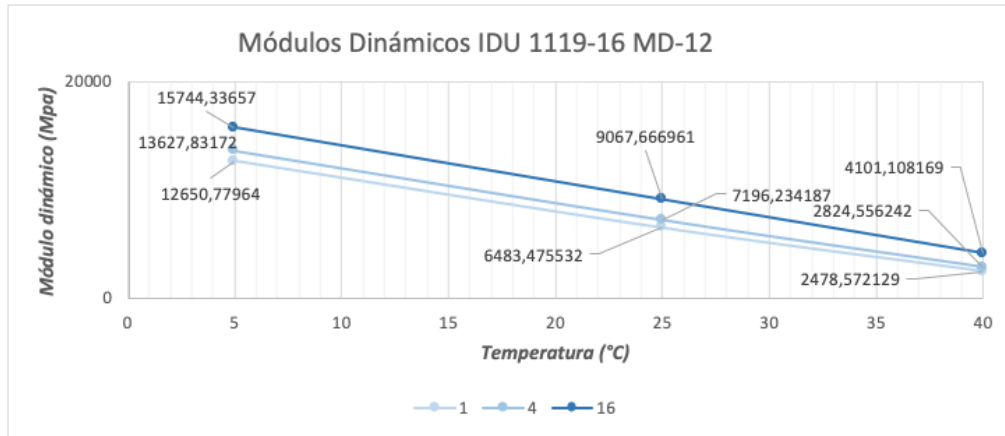
Gráfico 32. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1119-16



Nota: Modulo dinámico con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.



Gráfico 33. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16



Nota: Modulo dinámico con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### Modulo resiliente

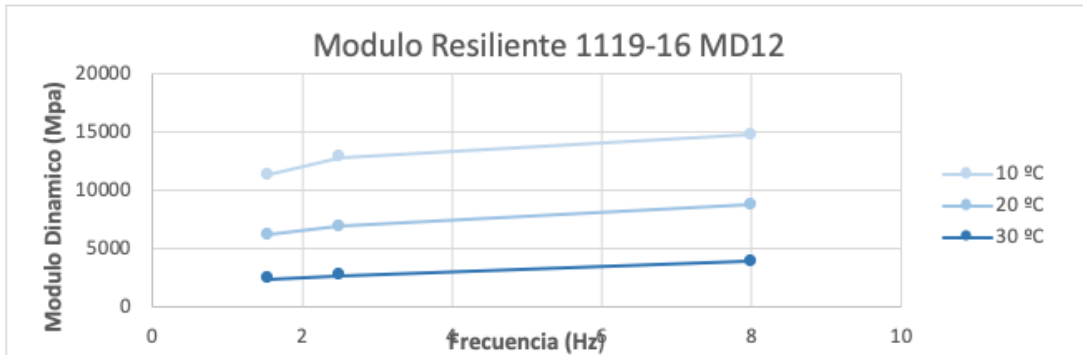
Este laboratorio se realizó mediante el método ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNEN 12697 26 ANEXO C

Tabla 95. Resultados ensayo de modulo resiliente para MD12, IDU-1119-16

| MODULO RESILIENTE IDU 1119-16 MD12 |                 |                       |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                         | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10                                 | 8               | 14725                 |
|                                    | 2,5             | 12776                 |
|                                    | 1,56            | 11274                 |
| 20                                 | 8               | 8738                  |
|                                    | 2,5             | 6876                  |
|                                    | 1,56            | 6177                  |
| 30                                 | 8               | 3894                  |
|                                    | 2,5             | 2664                  |
|                                    | 1,56            | 2344                  |
| Frecuencia (Hz)                    | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1,56                               | 30              | 2344                  |
|                                    | 20              | 6177                  |
|                                    | 10              | 11274                 |
| 2,5                                | 30              | 2664                  |
|                                    | 20              | 6876                  |
|                                    | 10              | 12776                 |
| 8                                  | 30              | 3894                  |
|                                    | 20              | 8738                  |
|                                    | 10              | 14725                 |

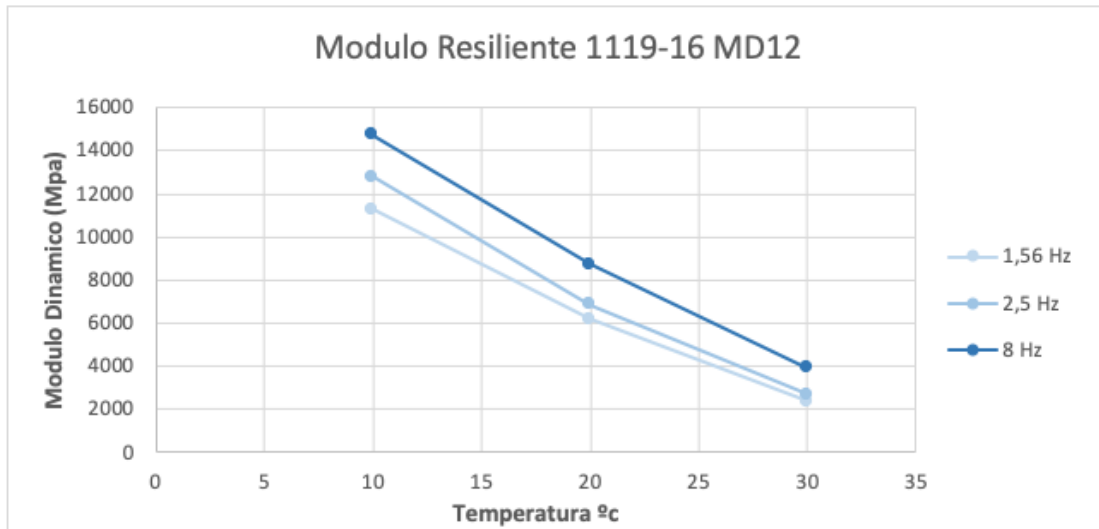
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 34. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1119-16



Nota: Modulo resiliente con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 35. Tendencia del módulo resiliente modulo vs temperatura (MD12) IDU-1119-16



Nota: Modulo resiliente con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### Mezcla asfáltica MD20

A esta mezcla se le realizaron los laboratorios de Fatiga, adherencia, ahuellamiento, modulo resiliente y modulo dinámico, también cuenta con las siguientes especificaciones que se verificaron mediante laboratorios básicos del pavimento, la calidad de los materiales con los que se hará la mezcla asfáltica, con el fin de comprobar el cumplimiento de las normas establecidas para la ciudad, en este caso Bogotá.

Tabla 96. Granulometría correspondiente para MD20, IDU-1119-16

| MD20 - IDU-1119-16 |                  |                |
|--------------------|------------------|----------------|
|                    | TIPO DE AGREGADO | ESPECIFICACIÓN |
| GRANULOMETRÍA      | Triturado 1"     | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena triturada  | IDU-ET-510-11  |
|                    | Arena Lavada     | IDU-ET-510-11  |

Nota: Los diferentes tipos de agregados seleccionados para la mezcla cumplen con las especificaciones establecidas en la tabla.

Tabla 97. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1119-16

| MD20 - IDU-1119-16 |                                            |             |           |            |
|--------------------|--------------------------------------------|-------------|-----------|------------|
|                    | ENSAYO                                     | NORMA       | RESULTADO | PARÁMETRO  |
| ASFALTO            | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, (mm/10)    | I.N.V.E-706 | 65        | 60 - 70    |
|                    | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712 | 50,2      | 45 - 55 °C |
|                    | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa - s)         | I.N.V.E-717 | 2280      | 1500-3000  |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones las cuales están dentro de los parámetros dados.

Tabla 98. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica MD20, IDU-1119-16

| MD20 - IDU-1119-16                   |                                            |                                   |           |             |
|--------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------|
|                                      | ENSAYO                                     | NORMA                             | RESULTADO | PARÁMETRO   |
| DISEÑO<br>PRELIMINAR DE LA<br>MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO (%)  | I.N.V.E-748/732-13                | 5,7%      | -           |
|                                      | Compactación (golpes/cara)                 | I.N.V.E-748-13                    | 75        | 75          |
|                                      | Estabilidad mínima (kg/N)                  | I.N.V.E-748-13                    | 1467      | ≥900Kg      |
|                                      | Flujo (mm)                                 | I.N.V.E-748-13                    | 3,4       | 2,0 - 3,5mm |
|                                      | Vacíos con aire Va, (%)                    | I.N.V.E-736/799-13 Manual<br>MS-2 | 4,9%      | 4,0 - 6,0%  |
|                                      | Vacíos en los agregados minerales VAM, (%) | I.N.V.E-799-13 Manual MS-2        | 15,3%     | ≥14         |
|                                      | Vacíos llenos de asfalto VFA, (%)          | I.N.V.E-799-13                    | 68,2%     | 65 a 75%    |
|                                      |                                            |                                   |           |             |

Nota: Se evidencia el cumplimiento de las especificaciones por parte del diseño preliminar de la mezcla.

### Fatiga

Este laboratorio se hizo mediante el método de Tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNE-EN 129697-24: ANEXO E.

Tabla 99. Resultados ensayo de fatiga para MD20, IDU-1119-16

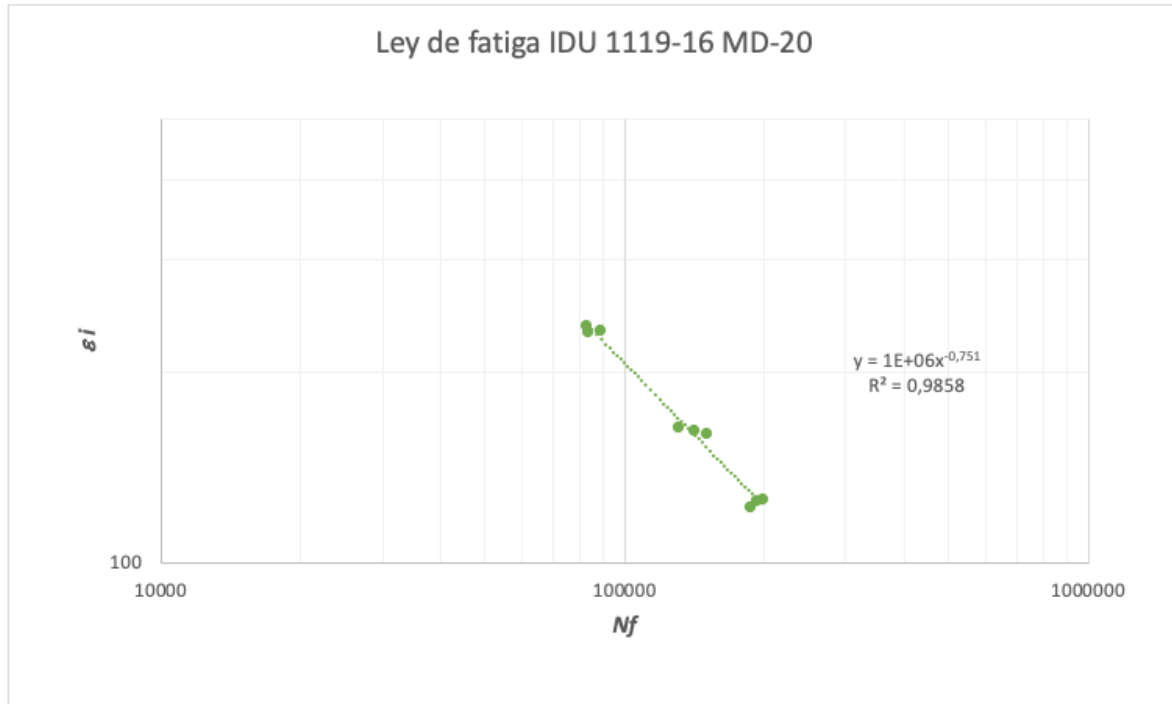
| FATIGA MD-20 IDU-1119-16 |           |        |         |          |
|--------------------------|-----------|--------|---------|----------|
| $e (\propto def)$        | $e (def)$ | $N_f$  | $Ln e$  | $Ln N_f$ |
| 122                      | 0,000122  | 188300 | 2,08636 | 5,27485  |
| 125                      | 0,000125  | 193800 | 2,09691 | 5,28735  |
| 126                      | 0,000126  | 199420 | 2,10037 | 5,29977  |
| 161                      | 0,000161  | 142200 | 2,20683 | 5,15290  |
| 159                      | 0,000159  | 151200 | 2,20140 | 5,17955  |
| 163                      | 0,000163  | 131900 | 2,21219 | 5,12024  |
| 230                      | 0,000230  | 84120  | 2,36173 | 4,92490  |
| 232                      | 0,000232  | 89550  | 2,36549 | 4,95207  |
| 235                      | 0,000235  | 82900  | 2,37107 | 4,91855  |

Nota: Datos obtenidos al realizar el laboratorio.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **37** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\varepsilon_i = 1173793N_f^{-0,751}$$

Gráfico 36. Deformación vs Numero de repeticiones (MD20) IDU-1119-16



Nota: Con los datos de la Tabla 98 se obtuvo esta grafica.

### Adherencia

Este laboratorio se hizo mediante el método de Ensayo de susceptibilidad al agua de mezclas asfálticas (TSR) bajo la norma I.N.V.E-725-13.

Tabla 100. Resultados del ensayo de susceptibilidad al agua para MD20, IDU-1119-16

| ADHERENCIA MD20 1397-17                                  |               |             |               |                  |                                |                                |
|----------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS EN SECO                |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 1                                                        | 1             | 66,5        | 101,2         | 729,2            | 676,5                          | 98,1                           |
|                                                          | 2             | 65,8        | 101,3         | 868,3            | 813,3                          | 118,0                          |
|                                                          | 3             | 65,7        | 101,3         | 831,3            | 779,8                          | 113,1                          |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 756,5                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 109,7                          |                                |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROBETAS ACONDICIONADAS EN AGUA |               |             |               |                  |                                |                                |
| Grupo                                                    | Probeta (No.) | Altura (mm) | Diámetro (mm) | Estabilidad (kg) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (Kpa) | RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI) |
| 2                                                        | 4             | 65,5        | 101,3         | 604,2            | 566,1                          | 82,1                           |
|                                                          | 5             | 65,8        | 101,3         | 769,2            | 720,5                          | 104,5                          |
|                                                          | 6             | 65,9        | 101,1         | 721,25           | 675,8                          | 98,0                           |
| RESISTENCIA A LA TENSIÓN PROMEDIO                        |               |             |               | (Kpa)            | 654,1                          |                                |
|                                                          |               |             |               | (PSI)            | 94,9                           |                                |

Nota: Datos obtenidos al realizar el ensayo según las normas establecidas.

Tabla 101. Relación de resistencia a la tensión

**RELACIÓN DE RESISTENCIA A LA TENSIÓN (%) MD20** 86,5%

Nota: Este resultado se obtiene del porcentaje obtenido en la relación del RTH y el RTS en Kpa.

### Ahuellamiento o deformación plástica

Este laboratorio se realizó mediante el método la pista de ensayo de laboratorio bajo la norma INVE 756/13.

Tabla 102. Resultados ensayo de ahuellamiento para MD20, IDU-1119-16

| DEFORMACIÓN PLÁSTICA MD20 1119-16 |                     |                       |                       |              |                     |                       |                       |              |                     |                       |                       |                       |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| PROBETA 1                         |                     |                       |                       | PROBETA 2    |                     |                       |                       | PROBETA 3    |                     |                       |                       | PROMEDIO<br>DEF (αm)  |
| Tiempo (min)                      | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(αm)   | Diferencia (mm)       | Tiempo (min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(αm)   | Diferencia (mm)       | Tiempo (min) | Deformación<br>(mm) | Deformación<br>(αm)   | Diferencia (mm)       |                       |
| 0                                 | 0,248               | 248                   | 0,000                 | 0            | 0,215               | 215                   | 0,000                 | 0            | 0,310               | 310                   | 0,000                 | 258                   |
| 1                                 | 0,698               | 698                   | 0,450                 | 1            | 0,718               | 718                   | 0,503                 | 1            | 0,708               | 708                   | 0,398                 | 708                   |
| 3                                 | 0,805               | 805                   | 0,107                 | 3            | 0,836               | 836                   | 0,118                 | 3            | 0,821               | 821                   | 0,113                 | 821                   |
| 5                                 | 0,916               | 916                   | 0,111                 | 5            | 0,952               | 952                   | 0,116                 | 5            | 0,934               | 934                   | 0,113                 | 934                   |
| 10                                | 1,092               | 1092                  | 0,176                 | 10           | 1,120               | 1120                  | 0,168                 | 10           | 1,106               | 1106                  | 0,172                 | 1106                  |
| 15                                | 1,101               | 1101                  | 0,009                 | 15           | 1,205               | 1205                  | 0,085                 | 15           | 1,153               | 1153                  | 0,047                 | 1153                  |
| 20                                | 1,167               | 1167                  | 0,066                 | 20           | 1,219               | 1219                  | 0,014                 | 20           | 1,190               | 1190                  | 0,037                 | 1192                  |
| 25                                | 1,215               | 1215                  | 0,048                 | 25           | 1,240               | 1240                  | 0,021                 | 25           | 1,228               | 1228                  | 0,038                 | 1228                  |
| 30                                | 1,246               | 1246                  | 0,031                 | 30           | 1,251               | 1251                  | 0,011                 | 30           | 1,248               | 1248                  | 0,020                 | 1248                  |
| 35                                | 1,266               | 1266                  | 0,020                 | 35           | 1,274               | 1274                  | 0,023                 | 35           | 1,270               | 1270                  | 0,022                 | 1270                  |
| 40                                | 1,271               | 1271                  | 0,005                 | 40           | 1,281               | 1281                  | 0,007                 | 40           | 1,276               | 1276                  | 0,006                 | 1276                  |
| 45                                | 1,279               | 1279                  | 0,008                 | 45           | 1,290               | 1290                  | 0,009                 | 45           | 1,284               | 1284                  | 0,008                 | 1284                  |
| 60                                | 1,285               | 1285                  | 0,006                 | 60           | 1,309               | 1309                  | 0,019                 | 60           | 1,297               | 1297                  | 0,013                 | 1297                  |
| 75                                | 1,296               | 1296                  | 0,011                 | 75           | 1,319               | 1319                  | 0,010                 | 75           | 1,307               | 1307                  | 0,010                 | 1307                  |
| 90                                | 1,302               | 1302                  | 0,006                 | 90           | 1,347               | 1347                  | 0,028                 | 90           | 1,324               | 1324                  | 0,017                 | 1324                  |
| 105                               | 1,333               | 1333                  | 0,031                 | 105          | 1,434               | 1434                  | 0,087                 | 105          | 1,383               | 1383                  | 0,059                 | 1383                  |
| 120                               | 1,384               | 1384                  | 0,051                 | 120          | 1,454               | 1454                  | 0,020                 | 120          | 1,417               | 1417                  | 0,034                 | 1418                  |
| PROBETA 1                         |                     |                       |                       | PROBETA 2    |                     |                       |                       | PROBETA 3    |                     |                       |                       | PROMEDIO<br>PROBETAS  |
| PERIODO                           | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(αm/min) | PERIODO      | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(αm/min) | PERIODO      | Deformación<br>(mm) | Velocidad<br>(mm/min) | Velocidad<br>(αm/min) | Velocidad<br>(αm/min) |
| 30 - 45                           | 0,033               | 0,0022                | 2,2                   | 30 - 45      | 0,039               | 0,0026                | 2,6                   | 30 - 45      | 0,036               | 0,0024                | 2,4                   | 2,4                   |
| 75 - 90                           | 0,006               | 0,0004                | 0,4                   | 75 - 90      | 0,028               | 0,0019                | 1,9                   | 75 - 90      | 0,017               | 0,0011                | 1,1                   | 1,1                   |
| 105 - 120                         | 0,051               | 0,0034                | 3,4                   | 105 - 120    | 0,020               | 0,0013                | 1,3                   | 105 - 120    | 0,034               | 0,0023                | 2,3                   | 2,3                   |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Tabla 103. Velocidad en μm/min obtenida según especificación.

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (αm/min) | Velocidad (αm/min)       |
| 2,3                | 15,0                     |

### Módulo dinámico

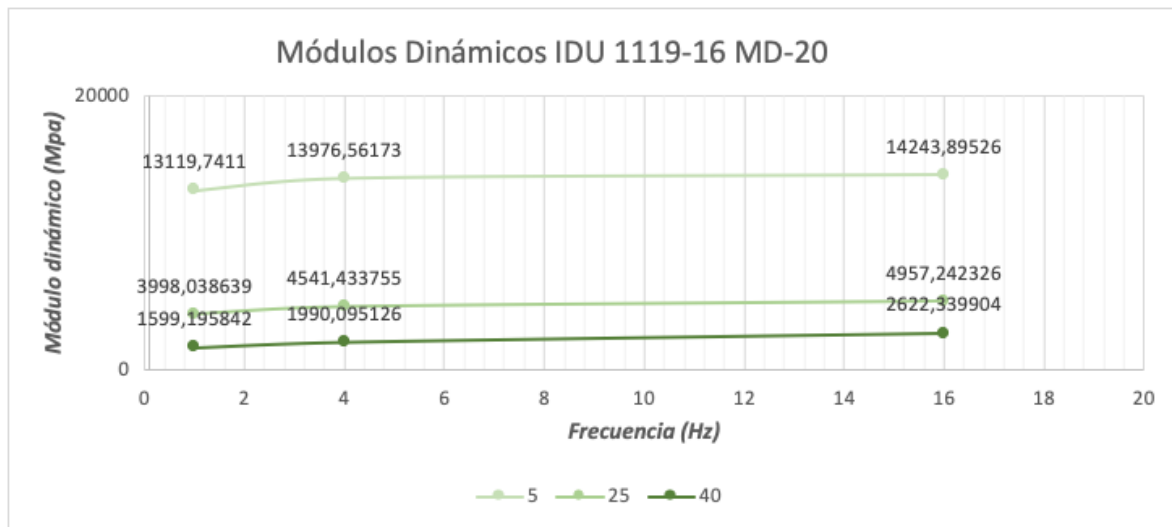
Este laboratorio se realizó mediante el método modulo dinámico de mezclas asfálticas  
bajo la norma INV E 754-07.

Tabla 104. Resultados ensayo de modulo dinámico para MD20, IDU-1119-16

| MODULO DINAMICO IDU 1119-16 MD-20 |                  |                                       |                       |
|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                        | Frecuencia (Hz)  | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5                                 | 1                | 133782                                | 13119,7               |
|                                   | 4                | 142519                                | 13976,6               |
|                                   | 16               | 145245                                | 14243,9               |
| 25                                | 1                | 40768                                 | 3998,0                |
|                                   | 4                | 46309                                 | 4541,4                |
|                                   | 16               | 50549                                 | 4957,2                |
| 40                                | 1                | 16307                                 | 1599,2                |
|                                   | 4                | 20293                                 | 1990,1                |
|                                   | 16               | 26740                                 | 2622,3                |
| Frecuencia (Hz)                   | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1                                 | 5                | 133782                                | 13119,7               |
|                                   | 25               | 40768                                 | 3998,0                |
|                                   | 40               | 16307                                 | 1599,2                |
| 4                                 | 5                | 142519                                | 13976,6               |
|                                   | 25               | 46309                                 | 4541,4                |
|                                   | 40               | 20293                                 | 1990,1                |
| 16                                | 5                | 145245                                | 14243,9               |
|                                   | 25               | 50549                                 | 4957,2                |
|                                   | 40               | 26740                                 | 2622,3                |

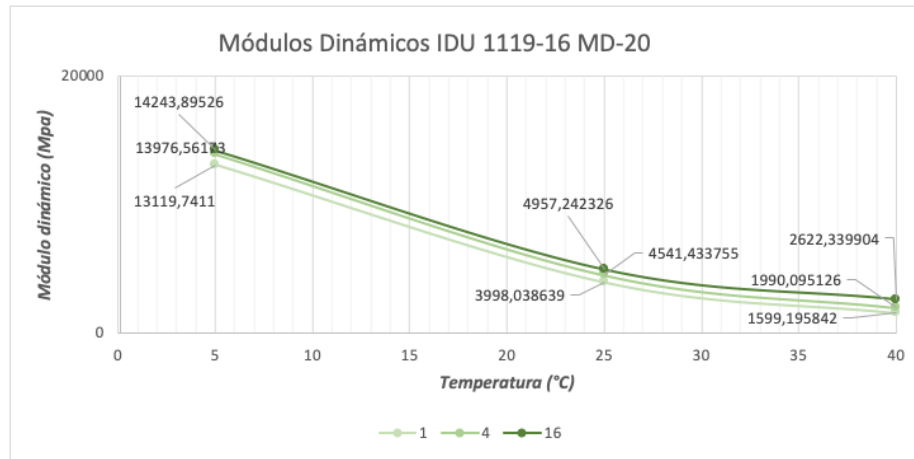
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 37. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1119-16



Nota: Modulo dinámico con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 38. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16



Nota: Modulo dinámico con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### Módulo resiliente

Este laboratorio se realizó mediante el método ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas bajo la norma UNEN 12697 26 ANEXO C

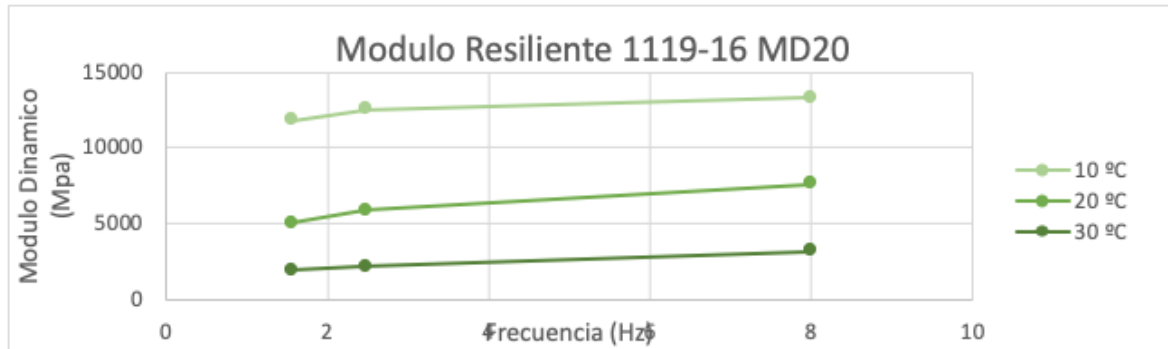
Tabla 105. Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1119-16

| MODULO RESILIENTE IDU 1119-16 MD20 |                 |                       |
|------------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                         | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 10                                 | 8               | 13277                 |
|                                    | 2,5             | 12495                 |
|                                    | 1,56            | 11828                 |
| 20                                 | 8               | 7589                  |
|                                    | 2,5             | 5860                  |
|                                    | 1,56            | 5057                  |
| 30                                 | 8               | 3154                  |
|                                    | 2,5             | 2178                  |
|                                    | 1,56            | 1934                  |
| Frecuencia (Hz)                    | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1,56                               | 30              | 1934                  |
|                                    | 20              | 5057                  |
|                                    | 10              | 11828                 |
| 2,5                                | 30              | 2178                  |
|                                    | 20              | 5860                  |
|                                    | 10              | 12495                 |
| 8                                  | 30              | 3154                  |
|                                    | 20              | 7589                  |
|                                    | 10              | 13277                 |

Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

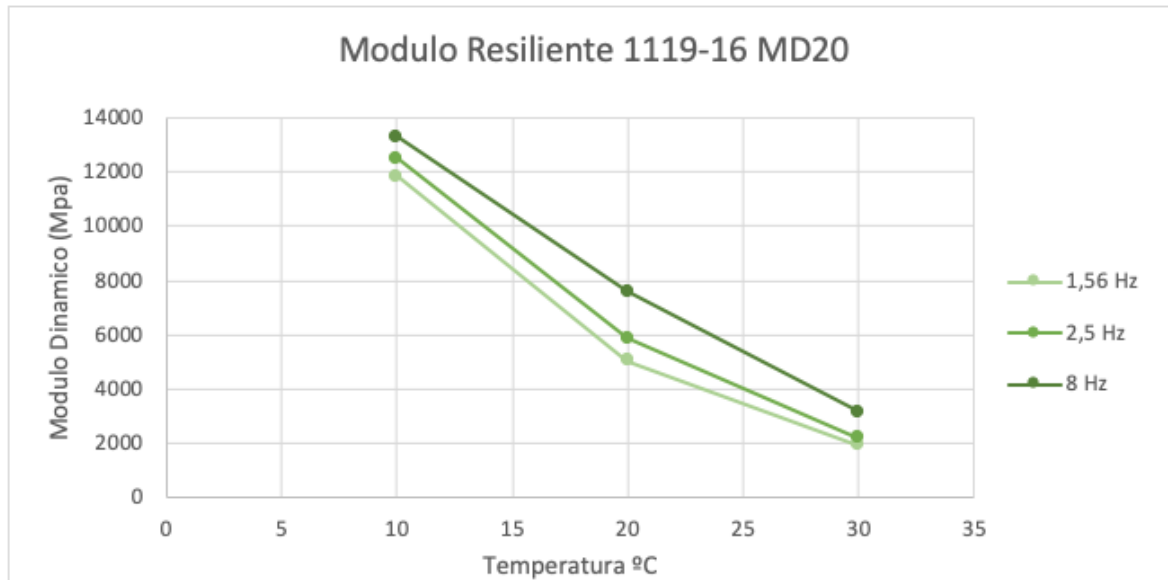


Gráfico 39. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1119-16



Nota: Modulo resiliente con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 40. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (MD20) IDU-1119-16



Nota: Modulo resiliente con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### IDU-1662-14

El contrato publico IDU-1662-14 tenía como objeto de contrato “Complementación y/o actualización y/o ajustes y/o diseños y construcción de la Avenida Ciudad de Cali, desde la Avenida Bosa hasta Avenida San Bernardino antes acuerdo 180 de 2005 modificado por acuerdo 527 de 2013, en Bogotá, D.C.” y para esto diseñaron tres tipos de mezclas.

### Mezcla asfáltica con grano de caucho reciclado (GCR)

Para esta mezcla se encontró el resultado del laboratorio de módulo resiliente.

#### Módulo resiliente

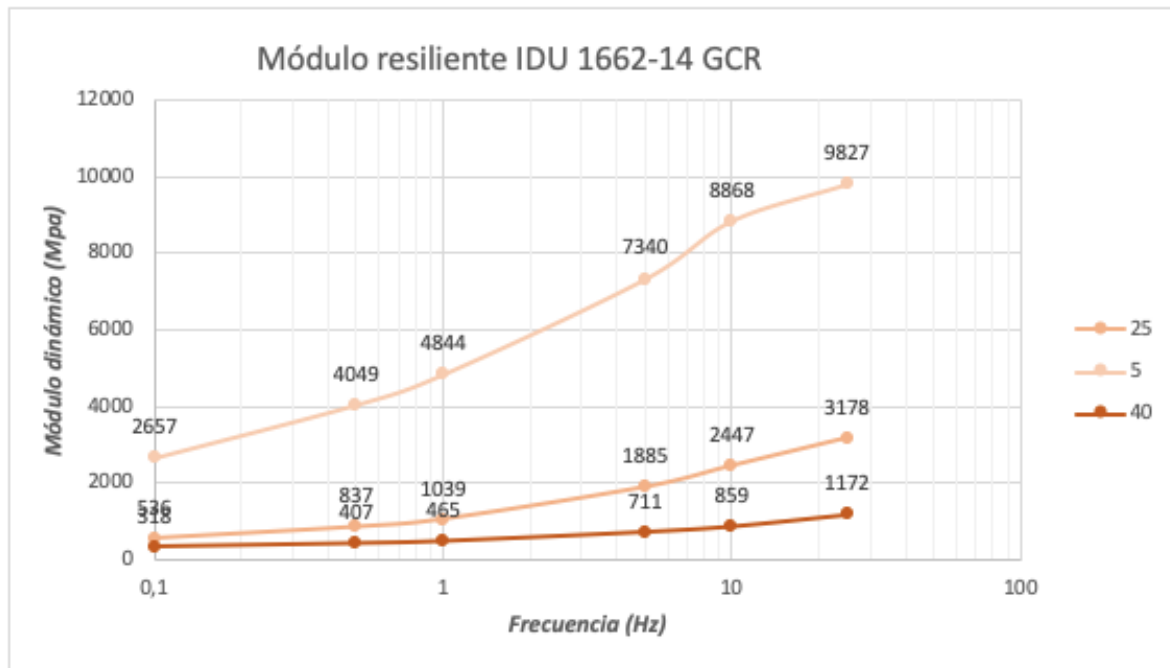
Este laboratorio se realizó mediante el ensayo de modulo dinámico de mezclas asfálticas bajo la norma (AASHTO T342/11).

Tabla 106. Resultados ensayo de modulo resiliente para GCR, IDU-1662-14

| MODULO RESILIENTE IDU 1662-14 GCR |                 |                       |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                        | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5                                 | 25              | 9827                  |
|                                   | 10              | 8868                  |
|                                   | 5               | 7340                  |
|                                   | 1               | 4844                  |
|                                   | 0,5             | 4049                  |
|                                   | 0,1             | 2657                  |
| 25                                | 25              | 3178                  |
|                                   | 10              | 2447                  |
|                                   | 5               | 1885                  |
|                                   | 1               | 1039                  |
|                                   | 0,5             | 837                   |
|                                   | 0,1             | 536                   |
| 40                                | 25              | 1172                  |
|                                   | 10              | 859                   |
|                                   | 5               | 711                   |
|                                   | 1               | 465                   |
|                                   | 0,5             | 407                   |
|                                   | 0,1             | 318                   |
| Frecuencia (Hz)                   | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 25                                | 5               | 9827                  |
|                                   | 25              | 3178                  |
|                                   | 40              | 1172                  |
| 10                                | 5               | 8868                  |
|                                   | 25              | 2447                  |
|                                   | 40              | 859                   |
| 5                                 | 5               | 7340                  |
|                                   | 25              | 1885                  |
|                                   | 40              | 711                   |
| 1                                 | 5               | 4844                  |
|                                   | 25              | 1039                  |
|                                   | 40              | 465                   |
| 0,5                               | 5               | 4049                  |
|                                   | 25              | 837                   |
|                                   | 40              | 407                   |
| 0,1                               | 5               | 2657                  |
|                                   | 25              | 536                   |
|                                   | 40              | 318                   |

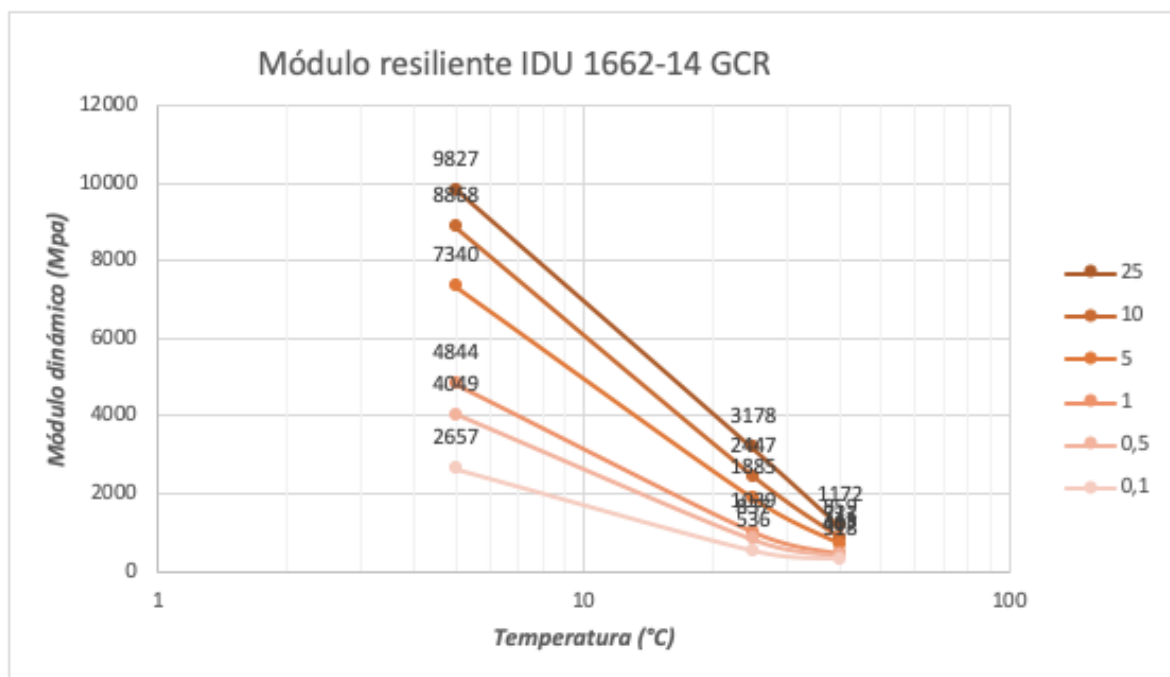
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo.

Gráfico 41. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (GCR) IDU-1662-14



Nota: Modulo resiliente con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 42. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (GCR) IDU-1662-14



Nota: Modulo resiliente con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

### Mezcla asfáltica MD12

Para esta mezcla se encontró el resultado del laboratorio de módulo dinámico.

#### Módulo dinámico

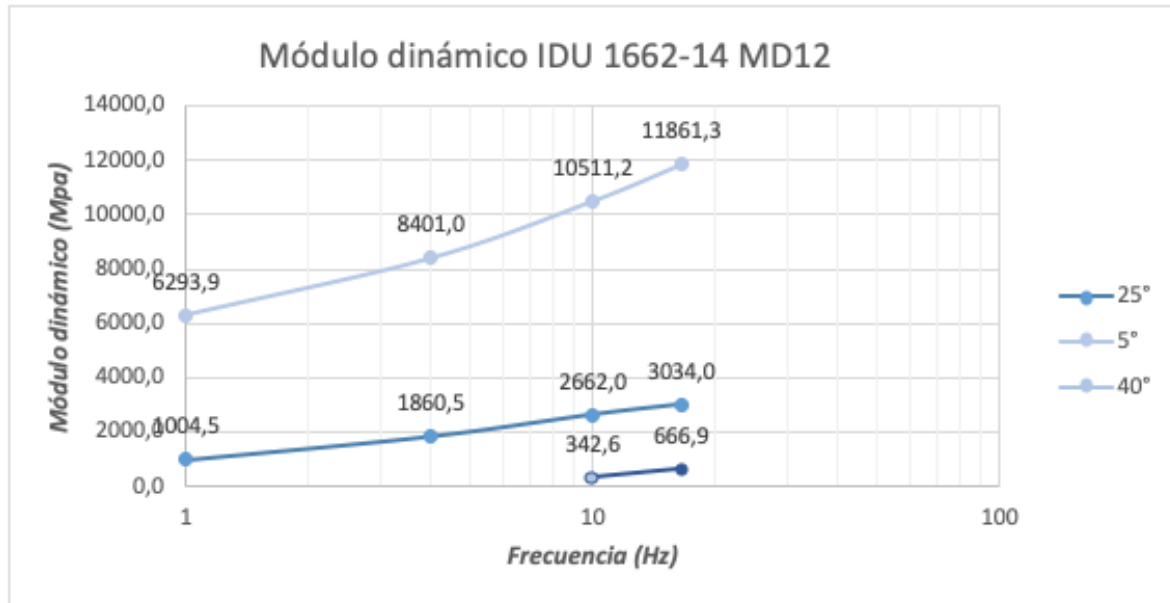
Este laboratorio se realizó mediante el método modulo dinámico de mezclas asfálticas bajo la norma INV E 754-07.

Tabla 107. Resultados ensayo de modulo dinámico para MD12, IDU-1662-14

| MODULO DINÁMICO IDU 1662-14 MD12 |                 |                                          |                             |
|----------------------------------|-----------------|------------------------------------------|-----------------------------|
| Temp. (°C)                       | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo<br>Dinámico<br>(Mpa) |
| 5°                               | 1               | 64179                                    | 6293,9                      |
|                                  | 4               | 85665                                    | 8401,0                      |
|                                  | 10              | 107183                                   | 10511,2                     |
|                                  | 16,5            | 120950                                   | 11861,3                     |
| 25°                              | 1               | 10243                                    | 1004,5                      |
|                                  | 4               | 18972                                    | 1860,5                      |
|                                  | 10              | 27144                                    | 2662,0                      |
|                                  | 16,5            | 30938                                    | 3034,0                      |
| 40°                              | 10              | 3493                                     | 342,6                       |
|                                  | 16,5            | 6800                                     | 666,9                       |
| Frecuencia (Hz)                  | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico<br>(Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo<br>Dinámico<br>(Mpa) |
| 1                                | 5               | 64179                                    | 6293,9                      |
|                                  | 25              | 10243                                    | 1004,5                      |
| 4                                | 5               | 85665                                    | 8401,0                      |
|                                  | 25              | 18972                                    | 1860,5                      |
| 10                               | 5               | 107183                                   | 10511,2                     |
|                                  | 25              | 27144                                    | 2662,0                      |
|                                  | 40              | 3493                                     | 342,6                       |
| 16,5                             | 5               | 120950                                   | 11861,3                     |
|                                  | 25              | 30938                                    | 3034,0                      |
|                                  | 40              | 6800                                     | 666,9                       |

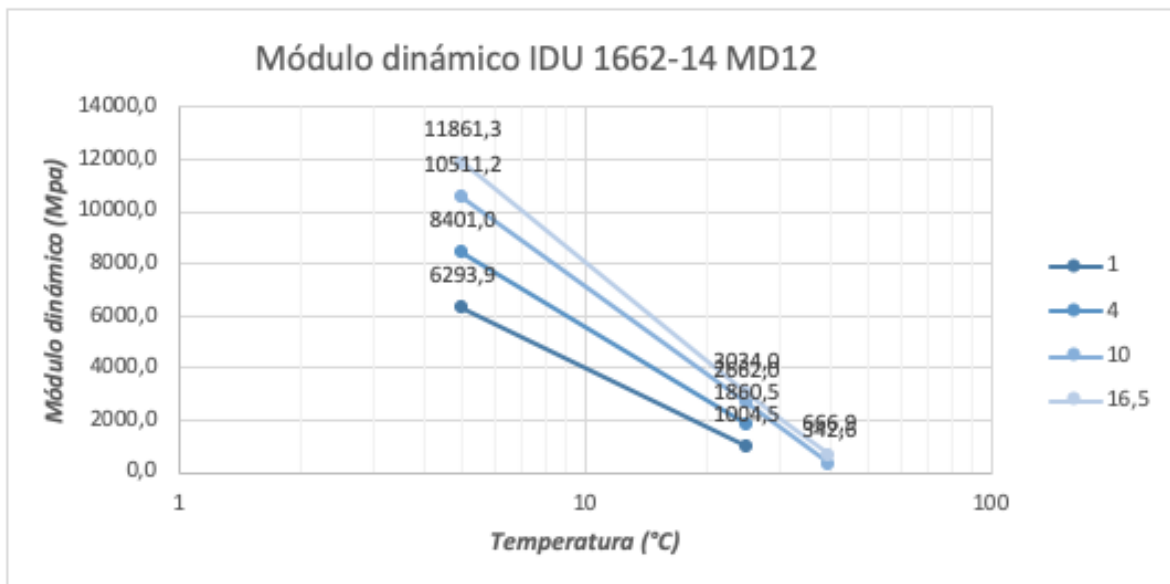
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 43. Tendencia del módulo dinámico modulo vs frecuencia (MD12) IDU-1662-14



*Nota: Modulo dinámico con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.*

Gráfico 44. Tendencia del módulo dinámico modulo vs temperatura (MD12) IDU-1662-14



*Nota: Modulo dinámico con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.*

### Mezcla asfáltica MD20

Para esta mezcla se encontró el resultado del laboratorio de módulo resiliente.

### Módulo resiliente

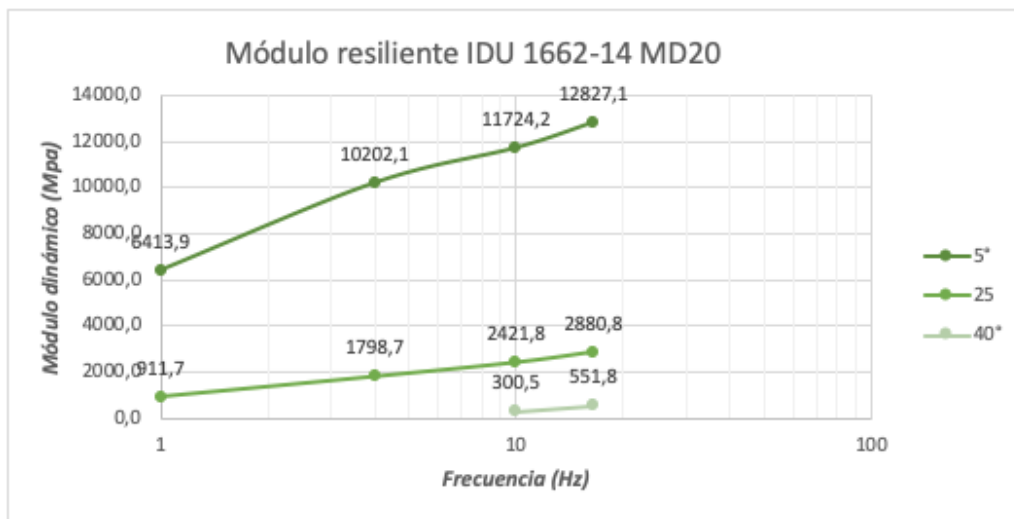
Este laboratorio se realizó mediante el método modulo dinámico de mezclas asfálticas bajo la norma INV E 754-07.

Tabla 108. Resultados ensayo de modulo resiliente para MD20, IDU-1662-14

| MODULO RESILIENTE IDU 1662-14 MD20 |                 |                                       |                       |
|------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                         | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 5°                                 | 1               | 65403                                 | 6413,9                |
|                                    | 4               | 104031                                | 10202,1               |
|                                    | 10              | 119552                                | 11724,2               |
|                                    | 16,5            | 130798                                | 12827,1               |
| 25                                 | 1               | 9297                                  | 911,7                 |
|                                    | 4               | 18341                                 | 1798,7                |
|                                    | 10              | 24695                                 | 2421,8                |
|                                    | 16,5            | 29376                                 | 2880,8                |
| 40°                                | 10              | 3064                                  | 300,5                 |
|                                    | 16,5            | 5627                                  | 551,8                 |
| Frecuencia (Hz)                    | Temp. (°C)      | Módulo Dinámico (Kg/cm <sup>2</sup> ) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 1                                  | 5               | 65403                                 | 6413,9                |
|                                    | 25              | 9297                                  | 911,7                 |
| 4                                  | 5               | 104031                                | 10202,1               |
|                                    | 25              | 18341                                 | 1798,7                |
| 10                                 | 5               | 119552                                | 11724,2               |
|                                    | 25              | 24695                                 | 2421,8                |
| 16,5                               | 40              | 3064                                  | 300,5                 |
|                                    | 5               | 130798                                | 12827,1               |
|                                    | 25              | 29376                                 | 2880,8                |
| 40                                 | 25              | 5627                                  | 551,8                 |

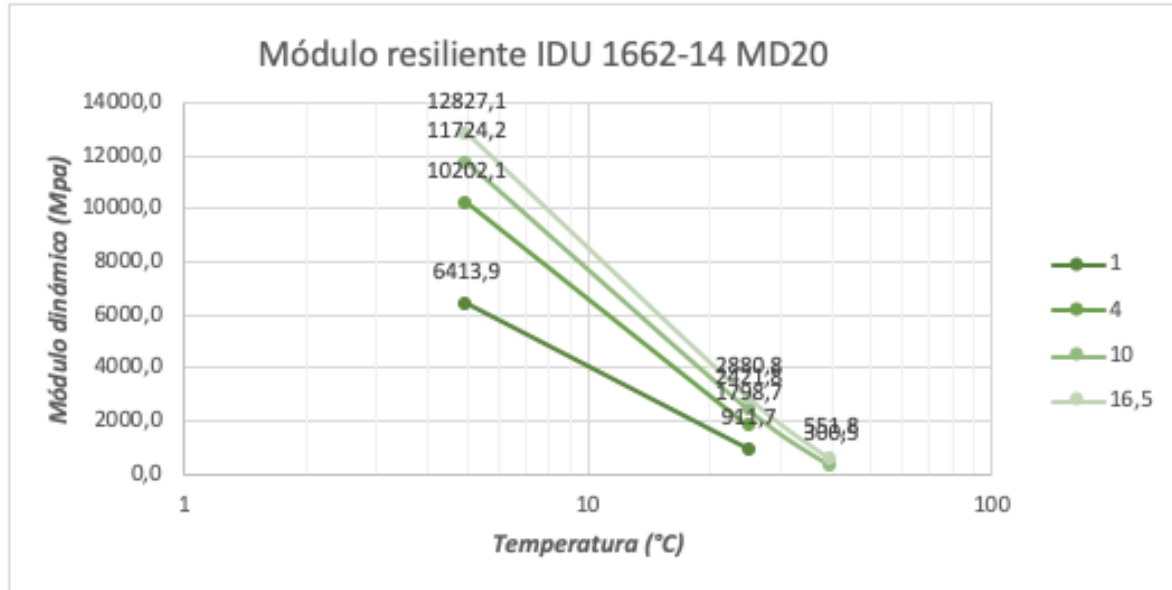
Nota: Datos obtenidos a partir de realizar el ensayo

Gráfico 45. Tendencia del módulo resiliente, modulo vs frecuencia (MD20) IDU-1662-14



Nota: Modulo resiliente con temperaturas(°c) constantes y frecuencias (Hz) variables.

Gráfico 46. Tendencia del módulo resiliente módulo vs temperatura (MD20) IDU-1662-14



Nota: Modulo resiliente con frecuencia (Hz) constante y temperatura (°c) variable.

## Convenio la Felicidad

### Mezcla asfáltica GCR |

Para la elaboración de las briquetas empleadas en el Diseño y en la Evaluación de Desempeño se utilizó Cemento Asfaltico Modificado con GCR con las siguientes características principales:

Tabla 109. Granulometría correspondiente a la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

|               | TIPO DE AGREGADO               | ORÍGEN | ESPECIFICACIÓN |
|---------------|--------------------------------|--------|----------------|
| GRANULOMETRÍA | Grava 3/4"                     | ATS    | IDU - 560 - 11 |
|               | Arena Río                      | COELLO | IDU - 560 - 11 |
|               | Grava 3/4" y Arena Trituración | FUSCA  | IDU - 560 - 11 |

Tabla 110. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

|                 | ENSAYO                                               | NORMA       | RESULTADO | PARÁMETRO |
|-----------------|------------------------------------------------------|-------------|-----------|-----------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm               | I.N.V.E-706 | 47        | 40-70     |
|                 | Punto de ablandamiento (°C)                          | I.N.V.E-712 | 65        | ≥ 52      |
|                 | Viscosidad a 163°C con viscosímetro rotacional, Pa-s | I.N.V.E-717 | 1,75      | 1,5-3,0   |

Tabla 111. Diseño preliminar de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

|                                | ENSAYO                                            | NORMA              | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|--------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------|-----------|------------|
| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA | CONTENIDO OPTIMO DE CEMENTO ASFÁLTICO CON GCR (%) | I.N.V.E-748/732-13 | 7,3       | -          |
|                                | Compactación (golpes/cara)                        | I.N.V.E-748-13     | 75        | -          |
|                                | Estabilidad, Kg                                   | I.N.V.E-748-13     | 2430,4    | -          |
|                                | Flujo (mm)                                        | I.N.V.E-748-13     | 3,4       | >2,0mm     |
|                                | Vacios con aire Va, (%)                           | I.N.V.E-736/799-13 | 4,2       | 3,0 a 5,0% |

Nota: Se escogió como el porcentaje de asfalto óptimo preliminar, el valor con el cuál se alcanza un porcentaje de vacíos de aire en la mezcla igual a 4%. Fuente: Privada.

## Fatiga

Las probetas aserradas fueron ensayadas en el equipo de 4 puntos. Las condiciones de ensayo son 10 Hz y 20°C de temperatura. El ensayo se realiza a deformación controlada por lo que se hizo la Ley de fatiga a diferentes niveles de deformación.

Tabla 112. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| FATIGA GCR LA FELICIDAD |                  |         |               |         |
|-------------------------|------------------|---------|---------------|---------|
| $\epsilon (\mu def)$    | $\epsilon (def)$ | Nf      | Ln $\epsilon$ | Ln Nf   |
| 225                     | 0,000225         | 29820   | 2,35218       | 4,47451 |
| 200                     | 0,000200         | 91869   | 2,30103       | 4,96317 |
| 150                     | 0,000150         | 300987  | 2,17609       | 5,47855 |
| 125                     | 0,000125         | 1194000 | 2,09691       | 6,07700 |

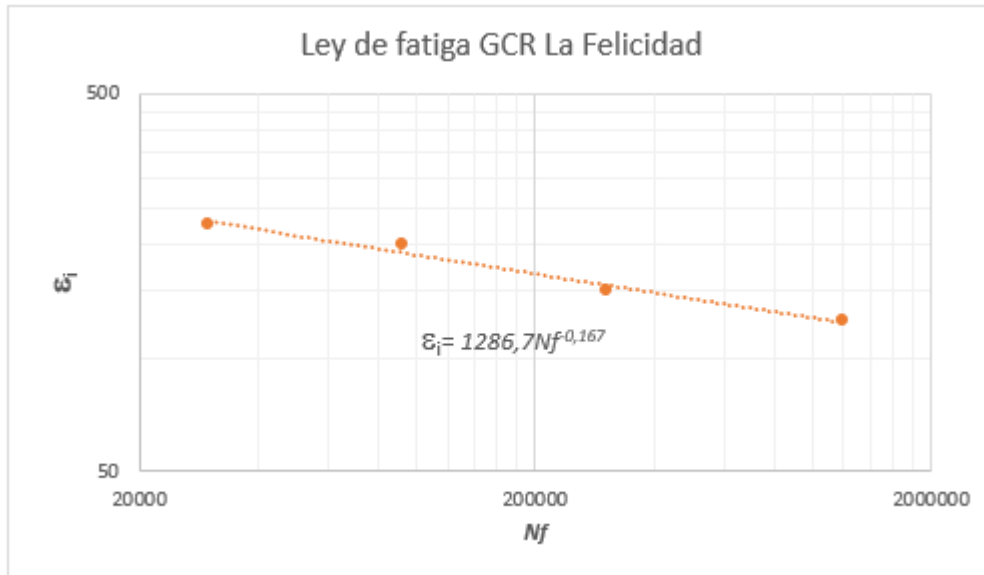
Nota: Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **128** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\epsilon_i = 1287Nf^{-0.167}$$



Gráfico 47. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica GCR. La Felicidad



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

### Adherencia

A continuación, se relacionan los resultados obtenidos en la evaluación de la Susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta.

Tabla 113 .Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| ADHERENCIA GCR LA FELICIDAD                                                 |                                                       |                      |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|
| Tipo de Mezcla Asfáltica                                                    | Especificación IDU Sección 560-<br>11 Numeral 560.7.2 | Resultado TSR<br>(%) |
| Mezcla Asfáltica GCR-IDU Tipo I con Cemento<br>Asfáltico Modificado con GCR | 75% Min                                               | 92,7%                |

### Deformación plástica

Método estándar de ensayo de pista para rueda de Hamburgo en inmersión para mezclas asfálticas compactadas en Caliente (AASHTO T 324-04)

Tabla 114. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| DEFORMACIÓN PLASTICA GCR LA FELICIDAD |                            |                   |                 |              |                            |                   |                 |              |                            |                   |                 |                    |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------|-----------------|--------------|----------------------------|-------------------|-----------------|--------------|----------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|
| 7.0 % Asf                             |                            |                   |                 | 7.3 %Asf     |                            |                   |                 | 7.6% Asf     |                            |                   |                 |                    |
| Tiempo (min)                          | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( μm) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( μm) | Diferencia (mm) | PROMEDIO DEF ( μm) |
| 0                                     | 0,00                       | 0                 | 0,00            | 0            | 0,00                       | 0                 | 0,00            | 0            | 0,00                       | 0                 | 0,00            | 0                  |
| 1                                     | 0,44                       | 440               | 0,44            | 1            | 0,38                       | 380               | 0,38            | 1            | 0,27                       | 270               | 0,27            | 217                |
| 2                                     | 0,65                       | 650               | 0,21            | 2            | 0,57                       | 570               | 0,19            | 2            | 0,40                       | 400               | 0,13            | 324                |
| 3                                     | 0,78                       | 780               | 0,13            | 3            | 0,70                       | 700               | 0,13            | 3            | 0,50                       | 500               | 0,10            | 401                |
| 5                                     | 0,97                       | 970               | 0,19            | 5            | 0,87                       | 870               | 0,17            | 5            | 0,62                       | 620               | 0,12            | 498                |
| 10                                    | 1,29                       | 1290              | 0,32            | 10           | 1,11                       | 1110              | 0,24            | 10           | 0,82                       | 820               | 0,20            | 647                |
| 15                                    | 1,50                       | 1500              | 0,21            | 15           | 1,27                       | 1270              | 0,16            | 15           | 0,96                       | 960               | 0,14            | 748                |
| 20                                    | 1,66                       | 1660              | 0,16            | 20           | 1,39                       | 1390              | 0,12            | 20           | 1,06                       | 1060              | 0,10            | 823                |
| 25                                    | 1,80                       | 1800              | 0,14            | 25           | 1,49                       | 1490              | 0,10            | 25           | 1,14                       | 1140              | 0,08            | 885                |
| 30                                    | 1,89                       | 1890              | 0,09            | 30           | 1,56                       | 1560              | 0,07            | 30           | 1,21                       | 1210              | 0,07            | 933                |
| 35                                    | 2,00                       | 2000              | 0,11            | 35           | 1,64                       | 1640              | 0,08            | 35           | 1,28                       | 1280              | 0,07            | 985                |
| 40                                    | 2,09                       | 2090              | 0,09            | 40           | 1,71                       | 1710              | 0,07            | 40           | 1,33                       | 1330              | 0,05            | 1027               |
| 45                                    | 2,17                       | 2170              | 0,08            | 45           | 1,76                       | 1760              | 0,05            | 45           | 1,38                       | 1380              | 0,05            | 1062               |
| 60                                    | 2,38                       | 2380              | 0,21            | 60           | 1,90                       | 1900              | 0,14            | 60           | 1,49                       | 1490              | 0,11            | 1150               |
| 75                                    | 2,55                       | 2550              | 0,17            | 75           | 2,01                       | 2010              | 0,11            | 75           | 1,58                       | 1580              | 0,09            | 1222               |
| 90                                    | 2,76                       | 2760              | 0,21            | 90           | 2,11                       | 2110              | 0,10            | 90           | 1,73                       | 1730              | 0,15            | 1310               |
| 105                                   | 2,97                       | 2970              | 0,21            | 105          | 2,19                       | 2190              | 0,08            | 105          | 1,84                       | 1840              | 0,11            | 1378               |
| 120                                   | 3,14                       | 3140              | 0,17            | 120          | 2,26                       | 2260              | 0,07            | 120          | 1,92                       | 1920              | 0,08            | 1433               |

| PROBETA 1 |             |           |           | PROBETA 2 |             |           |           | PROBETA 3 |             |           |           | PROMEDIO |
|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|----------|
| PERIODO   | Deformación | Velocidad |           | PERIODO   | Deformación | Velocidad |           | PERIODO   | Deformación | Velocidad |           | PROBETAS |
|           | (mm)        | (mm/min)  | ( μm/min) |           | (mm)        | (mm/min)  | ( μm/min) |           | (mm)        | (mm/min)  | ( μm/min) | (μm/min) |
| 30 - 45   | 0,28        | 0,02      | 18,67     | 30 - 45   | 0,20        | 0,01      | 13,33     | 30 - 45   | 0,17        | 0,01      | 11,33     | 14,4     |
| 75 - 90   | 0,21        | 0,01      | 14,00     | 75 - 90   | 0,10        | 0,01      | 6,67      | 75 - 90   | 0,15        | 0,01      | 10,00     | 10,2     |
| 105 - 120 | 0,17        | 0,01      | 11,33     | 105 - 120 | 0,07        | 0,00      | 4,67      | 105 - 120 | 0,08        | 0,01      | 5,33      | 7,1      |

Tabla 115. Velocidad en μm/min obtenida según especificación. La Felicidad

| PROMEDIO PROBETAS  | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------|--------------------------|
| Velocidad (μm/min) | Velocidad (μm/min)       |
| 7,1                | 15,0                     |

## Módulos

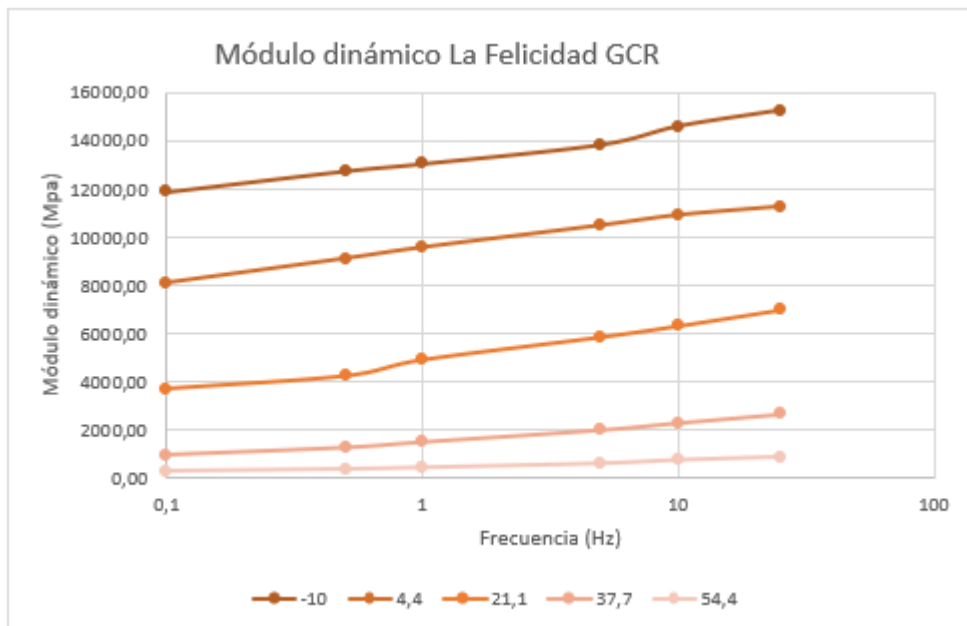
A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, utilizando la norma de ensayo AASHTO T342 para la “Determinación del Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en Caliente (Antes AASHTO TP 62-03(2005)).

Tabla 116. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| MODULO DINÁMICO LA FELICIDAD GCR |                 |                       |            |                 |                       |
|----------------------------------|-----------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                       | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) | Temp. (°C) | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| -10                              | 0,1             | 11896,03              | 37,7       | 0,1             | 931,33                |
|                                  | 0,5             | 12743,57              |            | 0,5             | 1238,37               |
|                                  | 1               | 13042,83              |            | 1               | 1467,57               |
|                                  | 5               | 13824,80              |            | 5               | 1974,47               |
|                                  | 10              | 14583,77              |            | 10              | 2266,97               |
| 4,4                              | 25              | 15233,87              | 54,4       | 25              | 2634,53               |
|                                  | 0,1             | 8078,67               |            | 0,1             | 288,60                |
|                                  | 0,5             | 9095,23               |            | 0,5             | 367,33                |
|                                  | 1               | 9557,23               |            | 1               | 428,37                |
|                                  | 5               | 10482,23              |            | 5               | 596,53                |
| 21,1                             | 10              | 10908,30              |            | 10              | 733,83                |
|                                  | 25              | 11265,63              |            | 25              | 862,93                |
|                                  | 0,1             | 3697,83               |            |                 |                       |
|                                  | 0,5             | 4230,50               |            |                 |                       |
|                                  | 1               | 4899,07               |            |                 |                       |
|                                  | 5               | 5844,73               |            |                 |                       |
|                                  | 10              | 6303,00               |            |                 |                       |
|                                  | 25              | 6963,97               |            |                 |                       |

Nota: Temperatura como variable constante. Fuente: Privada

Gráfico 48. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con GCR. La Felicidad



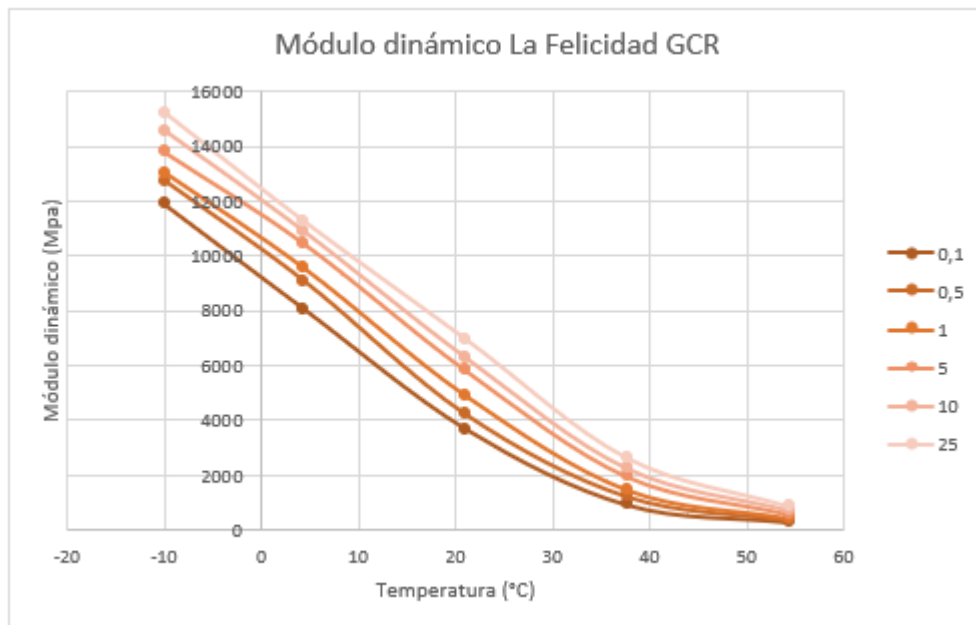
Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Propia

Tabla 117. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| MODULO DINÁMICO LA FELICIDAD GCR |                  |                       |                 |                  |                       |
|----------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Frecuencia (Hz)                  | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) | Frecuencia (Hz) | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 0,1                              | -10              | 11896,3               | 5               | -10              | 13824,8               |
|                                  | 4,4              | 8078,67               |                 | 4,4              | 10482,23              |
|                                  | 21,1             | 3697,83               |                 | 21,1             | 5844,73               |
|                                  | 37,7             | 931,33                |                 | 37,7             | 1974,47               |
|                                  | 54,4             | 288,6                 |                 | 54,4             | 596,53                |
| 0,5                              | -10              | 12743,57              | 10              | -10              | 14583,99              |
|                                  | 4,4              | 9095,23               |                 | 4,4              | 10908,3               |
|                                  | 21,1             | 4230,5                |                 | 21,1             | 6303                  |
|                                  | 37,7             | 1238,37               |                 | 37,7             | 2266,97               |
|                                  | 54,4             | 367,33                |                 | 54,4             | 733,83                |
| 1                                | -10              | 13042,83              | 25              | -10              | 15233,87              |
|                                  | 4,4              | 9557,23               |                 | 4,4              | 11265,63              |
|                                  | 21,1             | 4899,07               |                 | 21,1             | 6963,97               |
|                                  | 37,7             | 1467,57               |                 | 37,7             | 2634,53               |
|                                  | 54,4             | 428,37                |                 | 54,4             | 862,93                |

Nota: Frecuencia como variable constante. Fuente: Privada

Gráfico 49. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con GCR. La Felicidad



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Propia

### Mezcla asfáltica MD12

Para la elaboración de las briquetas empleadas en el Diseño Marshall se utiliza Cemento Asfáltico Modificado 60/70 Normalizado Aditivado con Promotor de Adherencia al 0,75% con las siguientes características principales:

*Tabla 118.* Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad

|                 | ENSAYO                                     | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|--------------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
| TIPO DE ASFALTO | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm     | I.N.V.E-706              | 63,9      | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento, anillo y bola (°C) | I.N.V.E-712              | 49        | 45 - 55 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa )            | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 2560      | >1500      |

### Fatiga

Las probetas aserradas fueron ensayadas en el equipo de 4 puntos. Las condiciones de ensayo son 10 Hz y 20°C de temperatura. El ensayo se realiza a deformación controlada por lo que se hizo la Ley de fatiga a diferentes niveles de deformación.

*Tabla 119.* Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD12. La Felicidad

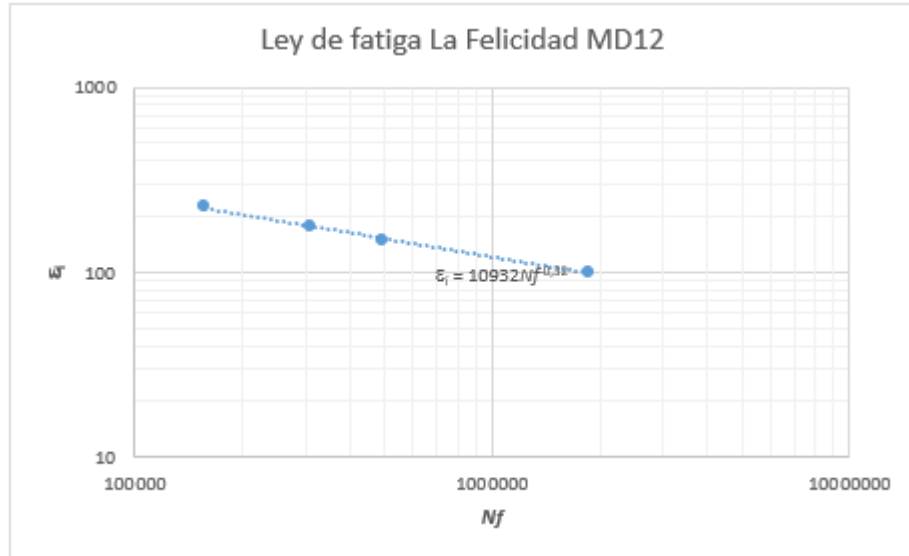
| FATIGA MD12 LA FELICIDAD |                  |         |               |         |
|--------------------------|------------------|---------|---------------|---------|
| $\epsilon$ ( $\mu$ def)  | $\epsilon$ (def) | Nf      | Ln $\epsilon$ | Ln Nf   |
| 100                      | 0,000100         | 1850500 | 2,00000       | 6,26729 |
| 150                      | 0,000150         | 490500  | 2,17609       | 5,69064 |
| 175                      | 0,000175         | 310441  | 2,24304       | 5,49198 |
| 225                      | 0,000225         | 156934  | 2,35218       | 5,19572 |

*Nota:* Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **121** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\epsilon_i = 10932Nf^{-0.326}$$

Gráfico 50. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD12. La Felicidad



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

## Adherencia

Esta prueba establece los procedimientos para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico con el propósito de medir el efecto del agua sobre la resistencia a la tracción indirecta. A continuación, se relacionan los resultados obtenidos en la evaluación de la Susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta.

Tabla 120. Resultados ensayo de susceptibilidad al agua de la mezcla asfáltica GCR. La Felicidad

| ADHERENCIA MD12 LA FELICIDAD                                  |                                               |       |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------|
| Tipo de Mezcla Asfáltica                                      | Especificación IDU Sección 560- Resultado TSR |       |
|                                                               | 11 Numeral 560.7.2                            | (%)   |
| Mezcla Asfáltica MDC 19 + Cemento Asfáltico 60/70 Normalizado | 80% Min                                       | 84,8% |

### Deformación plástica

Esta prueba sirve para evaluar la resistencia al rodamiento y susceptibilidad a la humedad de los materiales de pavimentación asfáltica, donde se simula el efecto del paso repetido de carga dinámica sobre una mezcla asfáltica sumergida en agua y poder encontrar la susceptibilidad al ahuellamiento. A continuación se observan los resultados obtenidos en el ensayo de pista para rueda de Hamburgo en inmersión para mezclas asfálticas compactadas en Caliente (AASHTO T 324-04).

Tabla 121. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad

| DEFORMACIÓN PLASTICA MD12 LA FELICIDAD |                            |                               |                                        |              |                            |                               |                                        |                                                 |
|----------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|--------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ESPÉCIMEN 1                            |                            |                               |                                        | ESPÉCIMEN 2  |                            |                               |                                        | PROMEDIO DEF ( $\mu\text{m}$ )                  |
| Tiempo (min)                           | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( $\mu\text{m}$ ) | Diferencia (mm)                        | Tiempo (min) | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( $\mu\text{m}$ ) | Diferencia (mm)                        |                                                 |
| 0                                      | 0,00                       | 0                             | 0,00                                   | 0            | 0,00                       | 0                             | 0,00                                   | 0                                               |
| 1                                      | 0,46                       | 460                           | 0,46                                   | 1            | 0,47                       | 470                           | 0,47                                   | 465                                             |
| 2                                      | 0,69                       | 690                           | 0,23                                   | 2            | 0,70                       | 700                           | 0,23                                   | 695                                             |
| 3                                      | 0,85                       | 850                           | 0,16                                   | 3            | 0,86                       | 860                           | 0,16                                   | 855                                             |
| 5                                      | 1,09                       | 1090                          | 0,24                                   | 5            | 1,10                       | 1100                          | 0,24                                   | 1095                                            |
| 10                                     | 1,48                       | 1480                          | 0,39                                   | 10           | 1,49                       | 1490                          | 0,39                                   | 1485                                            |
| 15                                     | 1,72                       | 1720                          | 0,24                                   | 15           | 1,73                       | 1730                          | 0,24                                   | 1725                                            |
| 20                                     | 1,90                       | 1900                          | 0,18                                   | 20           | 1,91                       | 1910                          | 0,18                                   | 1905                                            |
| 25                                     | 2,07                       | 2070                          | 0,17                                   | 25           | 2,08                       | 2080                          | 0,17                                   | 2075                                            |
| 30                                     | 2,20                       | 2200                          | 0,13                                   | 30           | 2,21                       | 2210                          | 0,13                                   | 2205                                            |
| 35                                     | 2,30                       | 2300                          | 0,10                                   | 35           | 2,31                       | 2310                          | 0,10                                   | 2305                                            |
| 40                                     | 2,40                       | 2400                          | 0,10                                   | 40           | 2,41                       | 2410                          | 0,10                                   | 2405                                            |
| 45                                     | 2,49                       | 2490                          | 0,09                                   | 45           | 2,50                       | 2500                          | 0,09                                   | 2495                                            |
| 60                                     | 2,71                       | 2710                          | 0,22                                   | 60           | 2,73                       | 2730                          | 0,23                                   | 2720                                            |
| 75                                     | 2,89                       | 2890                          | 0,18                                   | 75           | 2,91                       | 2910                          | 0,18                                   | 2900                                            |
| 90                                     | 3,04                       | 3040                          | 0,15                                   | 90           | 3,06                       | 3060                          | 0,15                                   | 3050                                            |
| 105                                    | 3,18                       | 3180                          | 0,14                                   | 105          | 3,19                       | 3190                          | 0,13                                   | 3185                                            |
| 120                                    | 3,31                       | 3310                          | 0,13                                   | 120          | 3,34                       | 3340                          | 0,15                                   | 3325                                            |
| PROBETA 1                              |                            |                               |                                        | PROBETA 2    |                            |                               |                                        | PROMEDIO Velocidad ( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) |
| PERIODO                                | Deformación (mm)           | Velocidad (mm/min)            | Velocidad ( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) | PERIODO      | Deformación (mm)           | Velocidad (mm/min)            | Velocidad ( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) |                                                 |
| 30 - 45                                | 0,29                       | 0,02                          | 19,33                                  | 30 - 45      | 0,29                       | 0,02                          | 19,33                                  | 19,3                                            |
| 75 - 90                                | 0,15                       | 0,01                          | 10,00                                  | 75 - 90      | 0,15                       | 0,01                          | 10,00                                  | 10,0                                            |
| 105 - 120                              | 0,13                       | 0,01                          | 8,67                                   | 105 - 120    | 0,15                       | 0,01                          | 10,00                                  | 9,3                                             |

Tabla 122. Velocidad en  $\mu\text{m}/\text{min}$  obtenida según especificación. La Felicidad

| PROMEDIO<br>PROBETAS                      | ESPECIFICACIÓN<br>MENOR QUE               |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Velocidad<br>( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) | Velocidad<br>( $\mu\text{m}/\text{min}$ ) |
| 9,3                                       | 15,0                                      |

### Módulos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, utilizando la norma de ensayo AASHTO T342 para la “Determinación del Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en Caliente (Antes AASHTO TP 62-03(2005)).

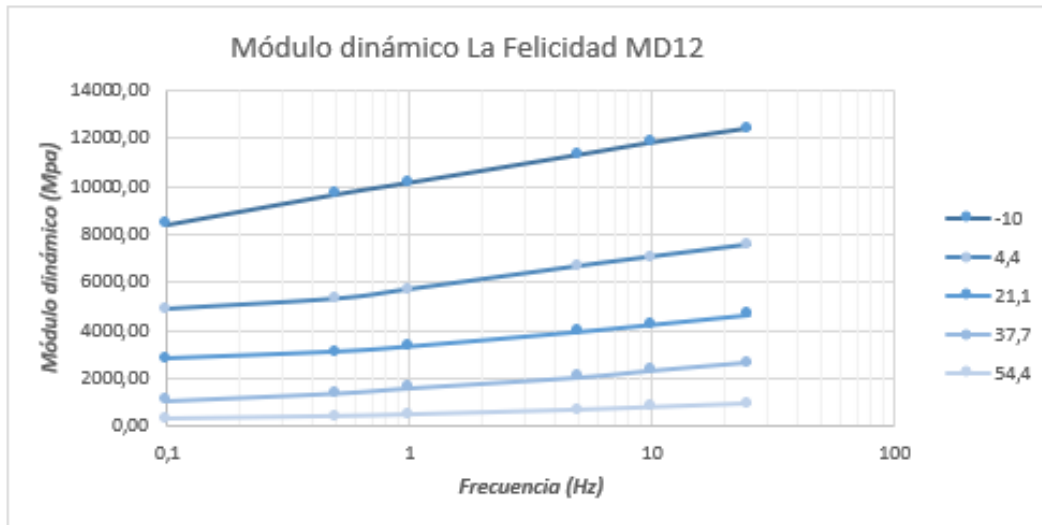
Tabla 123. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad

| MODULO DINÁMICO LA FELICIDAD MD12 |                 |                       |            |                 |                       |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                        | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) | Temp. (°C) | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| -10                               | 0,1             | 8402,80               | 37,7       | 0,1             | 1088,37               |
|                                   | 0,5             | 9665,13               |            | 0,5             | 1395,30               |
|                                   | 1               | 10154,70              |            | 1               | 1603,40               |
|                                   | 5               | 11313,93              |            | 5               | 2039,83               |
|                                   | 10              | 11823,67              |            | 10              | 2315,77               |
|                                   | 25              | 12412,07              |            | 25              | 2647,03               |
| 4,4                               | 0,1             | 4883,23               | 54,4       | 0,1             | 325,23                |
|                                   | 0,5             | 5309,10               |            | 0,5             | 425,33                |
|                                   | 1               | 5702,33               |            | 1               | 492,83                |
|                                   | 5               | 6660,23               |            | 5               | 684,37                |
|                                   | 10              | 7048,60               |            | 10              | 790,40                |
|                                   | 25              | 7549,27               |            | 25              | 936,40                |
| 21,1                              | 0,1             | 2820,03               |            |                 |                       |
|                                   | 0,5             | 3110,07               |            |                 |                       |
|                                   | 1               | 3327,83               |            |                 |                       |
|                                   | 5               | 3955,23               |            |                 |                       |
|                                   | 10              | 4257,07               |            |                 |                       |
|                                   | 25              | 4674,40               |            |                 |                       |

Nota: Temperatura como variable constante. Fuente: Privada



Gráfico 51. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD12. La Felicidad



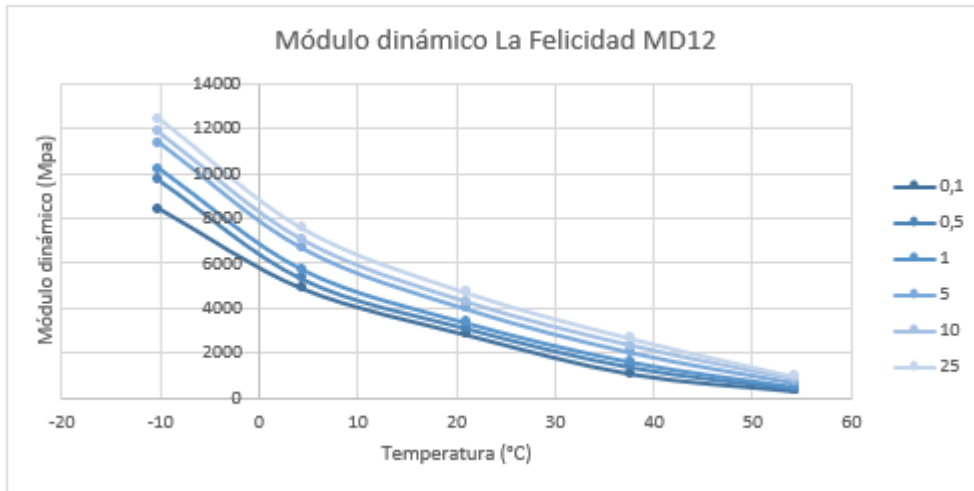
Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Propia

Tabla 124. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD12. La Felicidad

| MODULO DINÁMICO LA FELICIDAD MD12 |                  |                       |                 |                  |                       |
|-----------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Frecuencia (Hz)                   | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) | Frecuencia (Hz) | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 0,1                               | -10              | 8402,8                | 5               | -10              | 11313,93              |
|                                   | 4,4              | 4883,23               |                 | 4,4              | 6660,23               |
|                                   | 21,1             | 2820,03               |                 | 21,1             | 3955,23               |
|                                   | 37,7             | 1088,37               |                 | 37,7             | 2039,83               |
|                                   | 54,4             | 325,23                |                 | 54,4             | 684,37                |
| 0,5                               | -10              | 9665,13               | 10              | -10              | 11823,67              |
|                                   | 4,4              | 5309,1                |                 | 4,4              | 7048,6                |
|                                   | 21,1             | 3110,07               |                 | 21,1             | 4257,07               |
|                                   | 37,7             | 1395,3                |                 | 37,7             | 2315,77               |
|                                   | 54,4             | 425,33                |                 | 54,4             | 790,4                 |
| 1                                 | -10              | 10154,7               | 25              | -10              | 12412,07              |
|                                   | 4,4              | 5702,33               |                 | 4,4              | 7549,27               |
|                                   | 21,1             | 3327,83               |                 | 21,1             | 4674,4                |
|                                   | 37,7             | 1603,4                |                 | 37,7             | 2647,03               |
|                                   | 54,4             | 492,83                |                 | 54,4             | 936,4                 |

Nota: Frecuencia como variable constante. Fuente: Privada

Gráfico 52. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD12. La Felicidad



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Propia

### Mezcla asfáltica MD20

Para la elaboración de las briquetas empleadas en el Diseño Marshall se utiliza cemento asfáltico modificado 60/70 normalizado con las siguientes características principales:

Tabla 125. Ensayos sobre el asfalto de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad

| TIPO DE ASFALTO | ENSAYO                                 | NORMA                    | RESULTADO | PARÁMETRO  |
|-----------------|----------------------------------------|--------------------------|-----------|------------|
|                 | Penetración a 25°C, 100 g, 5 s, 0.1 mm | I.N.V.E-706              | 63,9      | 60 - 70    |
|                 | Punto de ablandamiento (°C)            | I.N.V.E-712              | 49        | 48 - 54 °C |
|                 | Viscosidad absoluta 60°C, (Pa )        | ASTMD-4402 INV.E-716/717 | 2560      | >1500      |

### Fatiga

Las probetas aserradas fueron ensayadas en el equipo de 4 puntos. Las condiciones de ensayo son 10 Hz y 20°C de temperatura. El ensayo se realiza a deformación controlada por lo que se hizo la Ley de fatiga a diferentes niveles de deformación.

Tabla 126. Resultados ensayo de fatiga para mezcla asfáltica MD20. La Felicidad

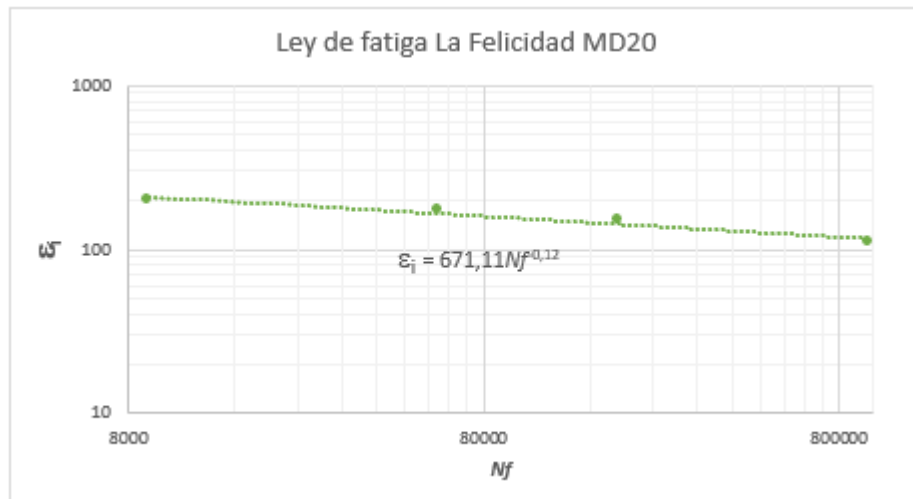
| FATIGA MD20 LA FELICIDAD       |                  |        |                |           |
|--------------------------------|------------------|--------|----------------|-----------|
| $\epsilon$ ( $\mu\text{def}$ ) | $\epsilon$ (def) | $N_f$  | $\ln \epsilon$ | $\ln N_f$ |
| 110                            | 0,000110         | 966978 | 2,04139        | 5,98542   |
| 150                            | 0,000150         | 191299 | 2,17609        | 5,28171   |
| 175                            | 0,000175         | 59500  | 2,24304        | 4,77452   |
| 200                            | 0,000200         | 9123   | 2,30103        | 3,96014   |

Nota: Método de flexión en cuatro puntos. Fuente: Privada.

El valor de la deformación inicial para 1.000.000 de ciclos es **116** obteniendo una ecuación de manera lineal, como se indica a continuación:

$$\epsilon_i = 671Nf^{-0.127}$$

Gráfico 53. Línea de tendencia ley de fatiga para mezcla asfáltica MD20. La Felicidad



Nota: Línea de tendencia potencial. Fuente: Privada.

### Deformación plástica

Esta prueba sirve para evaluar la resistencia al rodamiento de los materiales de pavimentación asfáltica. A continuación de observan los resultados obtenidos en el ensayo de pista para rueda de Hamburgo en inmersión para mezclas asfálticas compactadas en Caliente (AASHTO T 324-04).

Tabla 127. Resultados ensayo de ahuellamiento de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad

| DEFORMACIÓN PLASTICA MD20 LA FELICIDAD |                            |                        |                 |              |                            |                        |                 |                         |
|----------------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------|--------------|----------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|
| ESPÉCIMEN 1                            |                            |                        |                 | ESPÉCIMEN 2  |                            |                        |                 | PROMEDIO DEF ( $\mu$ m) |
| Tiempo (min)                           | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( $\mu$ m) | Diferencia (mm) | Tiempo (min) | Deformación acumulada (mm) | Deformación ( $\mu$ m) | Diferencia (mm) |                         |
| 0                                      | 0,00                       | 0                      | 0,00            | 0            | 0,00                       | 0                      | 0,00            | 0                       |
| 1                                      | 0,38                       | 380                    | 0,38            | 1            | 0,39                       | 390                    | 0,39            | 385                     |
| 2                                      | 0,55                       | 550                    | 0,17            | 2            | 0,56                       | 560                    | 0,17            | 555                     |
| 3                                      | 0,64                       | 640                    | 0,09            | 3            | 0,65                       | 650                    | 0,09            | 645                     |
| 5                                      | 0,77                       | 770                    | 0,13            | 5            | 0,78                       | 780                    | 0,13            | 775                     |
| 10                                     | 0,99                       | 990                    | 0,22            | 10           | 1,00                       | 1000                   | 0,22            | 995                     |
| 15                                     | 1,14                       | 1140                   | 0,15            | 15           | 1,15                       | 1150                   | 0,15            | 1145                    |
| 20                                     | 1,25                       | 1250                   | 0,11            | 20           | 1,26                       | 1260                   | 0,11            | 1255                    |
| 25                                     | 1,33                       | 1330                   | 0,08            | 25           | 1,34                       | 1340                   | 0,08            | 1335                    |
| 30                                     | 1,38                       | 1380                   | 0,05            | 30           | 1,39                       | 1390                   | 0,05            | 1385                    |
| 35                                     | 1,44                       | 1440                   | 0,06            | 35           | 1,45                       | 1450                   | 0,06            | 1445                    |
| 40                                     | 1,50                       | 1500                   | 0,06            | 40           | 1,51                       | 1510                   | 0,06            | 1505                    |
| 45                                     | 1,55                       | 1550                   | 0,05            | 45           | 1,56                       | 1560                   | 0,05            | 1555                    |
| 60                                     | 1,67                       | 1670                   | 0,12            | 60           | 1,69                       | 1690                   | 0,13            | 1680                    |
| 75                                     | 1,77                       | 1770                   | 0,10            | 75           | 1,79                       | 1790                   | 0,10            | 1780                    |
| 90                                     | 1,85                       | 1850                   | 0,08            | 90           | 1,86                       | 1860                   | 0,07            | 1855                    |
| 105                                    | 1,93                       | 1930                   | 0,08            | 105          | 1,94                       | 1940                   | 0,08            | 1935                    |
| 120                                    | 2,01                       | 2010                   | 0,08            | 120          | 2,04                       | 2040                   | 0,10            | 2025                    |

| PROBETA 1 |                  |                    |                          | PROBETA 2 |                  |                    |                          | PROMEDIO PROBETAS        |
|-----------|------------------|--------------------|--------------------------|-----------|------------------|--------------------|--------------------------|--------------------------|
| PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad ( $\mu$ m/min) | PERIODO   | Deformación (mm) | Velocidad (mm/min) | Velocidad ( $\mu$ m/min) | Velocidad ( $\mu$ m/min) |
| 30 - 45   | 0,17             | 0,01               | 11,33                    | 30 - 45   | 0,17             | 0,01               | 11,33                    | 11,3                     |
| 75 - 90   | 0,08             | 0,01               | 5,33                     | 75 - 90   | 0,07             | 0,00               | 4,67                     | 5,0                      |
| 105 - 120 | 0,08             | 0,01               | 5,33                     | 105 - 120 | 0,10             | 0,01               | 6,67                     | 6,0                      |

Tabla 128. Velocidad en  $\mu$ m/min obtenida según especificación. La Felicidad

| PROMEDIO PROBETAS        | ESPECIFICACIÓN MENOR QUE |
|--------------------------|--------------------------|
| Velocidad ( $\mu$ m/min) | Velocidad ( $\mu$ m/min) |
| 6,0                      | 15,0                     |

## Módulos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas, utilizando la norma de ensayo AASHTO T342 para la

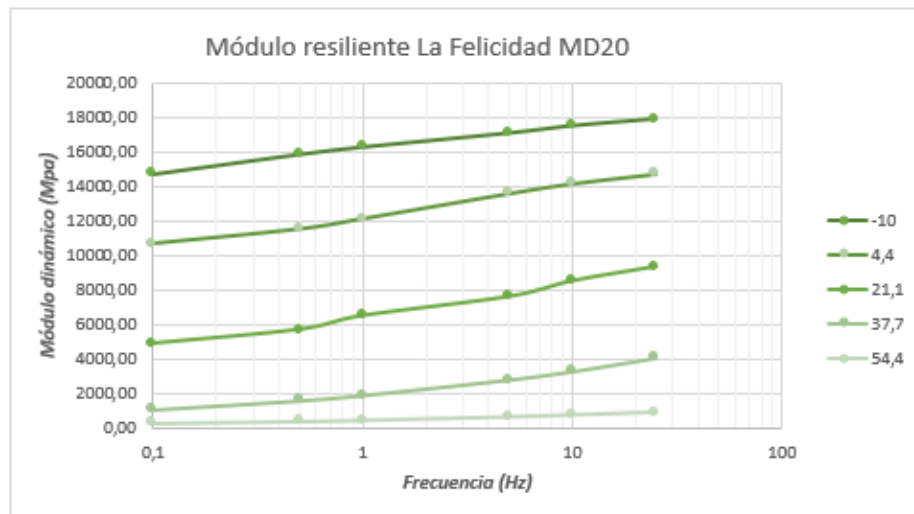
“Determinación del Módulo Dinámico de mezclas Asfálticas en Caliente (Antes AASHTO TP 62-03(2005)).

Tabla 129. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad

| MODULO RESILIENTE LA FELICIDAD MD20 |                 |                       |            |                 |                       |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------|-----------------|-----------------------|
| Temp. (°C)                          | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) | Temp. (°C) | Frecuencia (Hz) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| -10                                 | 0,1             | 14753,67              | 37,7       | 0,1             | 1099,30               |
|                                     | 0,5             | 15873,73              |            | 0,5             | 1626,90               |
|                                     | 1               | 16288,87              |            | 1               | 1936,87               |
|                                     | 5               | 17089,03              |            | 5               | 2840,10               |
|                                     | 10              | 17499,07              |            | 10              | 3320,90               |
|                                     | 25              | 17887,93              |            | 25              | 4099,80               |
| 4,4                                 | 0,1             | 10672,53              | 54,4       | 0,1             | 325,23                |
|                                     | 0,5             | 11531,17              |            | 0,5             | 425,33                |
|                                     | 1               | 12132,03              |            | 1               | 492,83                |
|                                     | 5               | 13610,03              |            | 5               | 684,37                |
|                                     | 10              | 14183,90              |            | 10              | 790,40                |
|                                     | 25              | 14753,53              |            | 25              | 936,40                |
| 21,1                                | 0,1             | 4912,23               |            |                 |                       |
|                                     | 0,5             | 5723,67               |            |                 |                       |
|                                     | 1               | 6521,23               |            |                 |                       |
|                                     | 5               | 7631,43               |            |                 |                       |
|                                     | 10              | 8539,20               |            |                 |                       |
|                                     | 25              | 9365,87               |            |                 |                       |

Nota: Temperatura como variable constante. Fuente: Privada

Gráfico 54. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD20. La Felicidad



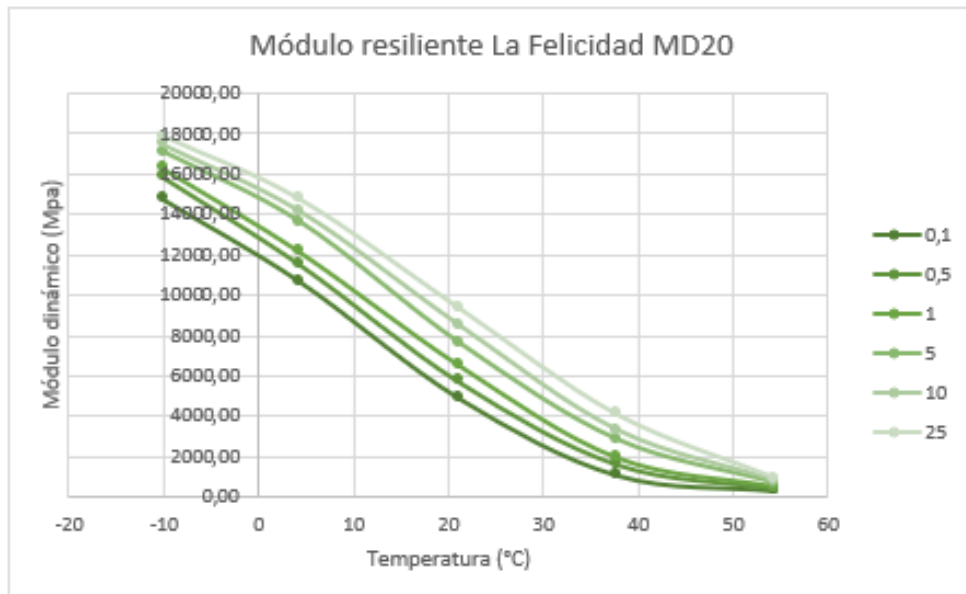
Nota: Se toma como variable constante a la frecuencia. Fuente: Propia

Tabla 130. Resultados ensayo módulo dinámico de la mezcla asfáltica MD20. La Felicidad

| MODULO RESILIENTE LA FELICIDAD MD20 |                  |                       |                 |                  |                       |
|-------------------------------------|------------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------------|
| Frecuencia (Hz)                     | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) | Frecuencia (Hz) | Temperatura (°C) | Módulo Dinámico (Mpa) |
| 0,1                                 | -10              | 14753,67              | 5               | -10              | 17089,03              |
|                                     | 4,4              | 10672,53              |                 | 4,4              | 13610,03              |
|                                     | 21,1             | 4912,23               |                 | 21,1             | 7631,43               |
|                                     | 37,7             | 1099,3                |                 | 37,7             | 2840,1                |
|                                     | 54,4             | 325,23                |                 | 54,4             | 684,37                |
| 0,5                                 | -10              | 15873,73              | 10              | -10              | 17499,07              |
|                                     | 4,4              | 11531,17              |                 | 4,4              | 14183,9               |
|                                     | 21,1             | 5723,67               |                 | 21,1             | 8539,2                |
|                                     | 37,7             | 1626,9                |                 | 37,7             | 3320,9                |
|                                     | 54,4             | 425,33                |                 | 54,4             | 790,4                 |
| 1                                   | -10              | 16288,87              | 25              | -10              | 17887,93              |
|                                     | 4,4              | 12132,03              |                 | 4,4              | 14753,53              |
|                                     | 21,1             | 6521,23               |                 | 21,1             | 9365,87               |
|                                     | 37,7             | 1936,87               |                 | 37,7             | 4099,8                |
|                                     | 54,4             | 492,83                |                 | 54,4             | 936,4                 |

Nota: Frecuencia como variable constante. Fuente: Privada

Gráfico 55. Módulo dinámico de mezcla asfáltica con MD20. La Felicidad



Nota: Se toma como variable constante a la temperatura. Fuente: Propia

### Análisis de resultados

A partir de los datos obtenidos anteriormente y la clasificación de estos, se obtuvieron los siguientes resultados de las propiedades físico-mecánicas de las mezclas asfálticas.

#### Tipo de asfalto

Tabla 131. Características del asfalto en las mezclas GCR-MD12-MD20

| MEZCLA | PLANTA / CONTRATO | TIPO DE ASFALTO          |                                        |                                                   |      |
|--------|-------------------|--------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------|------|
|        |                   | PENETRACIÓN (25°C, 100g) | PUNTO DE ABLANDAMIENTO (anillo y bola) | VISCOSIDAD                                        |      |
| GCR    | Planta 1          | 47                       | 67                                     | BROOKFIELD VISCOSIMETRO ROTACIONAL (163°C) (Pa-s) | 2,0  |
|        | IDU 1397 - 17     | 43                       | 68,2                                   | BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)                         | 2,8  |
|        | IDU 1119 - 16     | 67                       | 62,6                                   | BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)                         | 3    |
|        | PLANTA 2          | 53                       | 72                                     | BROOKFIELD (163°C) (Pa-s)                         | 3    |
|        | LA FELICIDAD      | 47                       | 65                                     | 163°C CON VISCOSIMETRO ROTACIONAL, (Pa-s)         | 1,75 |
| MD12   | Planta 1          | 69                       | 49                                     | ABSOLUTA 60°C, (Pa - s)                           | 294  |
|        | IDU 1397 - 17     | 65                       | 50,2                                   | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 228  |
|        | IDU 1119 - 16     | -                        | -                                      | -                                                 | -    |
|        | PLANTA 2          | 63                       | 48,7                                   | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 201  |
|        | LA FELICIDAD      | 63,9                     | 49                                     | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 256  |
| MD20   | Planta 1          | 69                       | 49                                     | ABSOLUTA 60°C, (Pa - s)                           | 294  |
|        | IDU 1397 - 17     | 65                       | 50,2                                   | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 228  |
|        | IDU 1119 - 16     | 65                       | 50,2                                   | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 228  |
|        | PLANTA 2          | 63                       | 48,7                                   | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 201  |
|        | LA FELICIDAD      | 63,9                     | 49                                     | ABSOLUTA 60°C, (Pa-s)                             | 256  |

Según la Tabla 131 se puede observar las diferentes características que posee el asfalto para las distintas mezclas, en el caso del GCR usa un asfalto duro y esto se ve representado en la penetración, la cual entre las tres mezclas esta es la que presenta la menor penetración y el mayor punto de ablandamiento, dado que este asfalto se modifica con caucho reciclado se calienta a una temperatura mayor para obtener las especificaciones que exige la norma I.N.V E-725 y así determinar la viscosidad mediante el viscosímetro rotacional. Teniendo en cuenta estos resultados se infiere que, gracias a estas características, la mezcla GCR tiene menos susceptibilidad a la temperatura.

En las mezclas MD12 y MD20 usan un asfalto blando 60 – 70, el cual tiene un punto de ablandamiento menor, pero presentan viscosidad mayor debido a la temperatura con la que se realiza el ensayo de punto de ablandamiento.

### Diseño preliminar de la mezcla

Tabla 132. Diseño preliminar de las mezclas GCR – MD12 – MD20

| DISEÑO PRELIMINAR DE LA MEZCLA |                   |                                          |                               |                            |            |                                |                           |                                                   |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------|
| MEZCLA                         | PLANTA / CONTRATO | CONTENIDO<br>ÓPTIMO DE<br>ASFALTO<br>(%) | COMPACTACIÓN<br>(golpes/cara) | ESTABILIDAD<br>MÍNIMA (kg) | FLUJO (mm) | RIGIDEZ<br>MARSHALL<br>(kg/mm) | VACIOS<br>CON AIRE<br>(%) | VACIOS EN<br>LOS<br>AGREGADOS<br>MINERALES<br>(%) |
| GCR                            | Planta 1          | 6,4%                                     | 75                            | 1391                       | 3,6        | 386,4                          | 4%                        | 15%                                               |
|                                | IDU 1397 - 17     | 7,1%                                     | 75                            | 1391                       | 3,2        | 434,7                          | 4%                        | 16%                                               |
|                                | IDU 1119 - 16     | 8,2%                                     | 75                            | 1588                       | 4,4        | 360,9                          | 4%                        | 16,7%                                             |
|                                | PLANTA 2          | 7%                                       | 75                            | 1337                       | 4,2        | 318,3                          | 4%                        | 15,4%                                             |
|                                | LA FELICIDAD      | 7,3%                                     | 75                            | 2430,4                     | 3,4        | 714,8                          | 4%                        | -                                                 |
| MD12                           | Planta 1          | 5,5%                                     | 75                            | 1460                       | 3,1        | 471,0                          | 5%                        | 15,6%                                             |
|                                | IDU 1397 - 17     | 6,0%                                     | 75                            | 1414                       | 2,8        | 505,0                          | 5%                        | 17%                                               |
|                                | IDU 1119 - 16     | -                                        | -                             | -                          | -          | -                              | -                         | -                                                 |
|                                | PLANTA 2          | 5,7%                                     | 75                            | 1350                       | 3,1        | 435,5                          | 5%                        | 15,9%                                             |
|                                | LA FELICIDAD      | -                                        | -                             | -                          | -          | -                              | -                         | -                                                 |
| MD20                           | Planta 1          | 4,8%                                     | 75                            | 1419                       | 3,1        | 457,7                          | 4,8%                      | 15%                                               |
|                                | IDU 1397 - 17     | 5,7%                                     | 75                            | 1467                       | 3,4        | 431,5                          | 4,9%                      | 15,3%                                             |
|                                | IDU 1119 - 16     | 5,7%                                     | 75                            | 1467                       | 3,4        | 431,5                          | 5%                        | 15,3%                                             |
|                                | PLANTA 2          | 4,9%                                     | 75                            | 1305                       | 2,9        | 450,0                          | 5%                        | 15,6%                                             |
|                                | LA FELICIDAD      | -                                        | -                             | -                          | -          | -                              | -                         | -                                                 |

El diseño Marshall es un ensayo monotónico que busca obtener la cantidad óptima de asfalto cumpliendo los parámetros de estabilidad, flujo y vacíos de aire entre otros.

Como se observa en la anterior tabla, la mezcla GCR tiene un contenido óptimo mayor debido a que al utilizar un asfalto muy duro es una mezcla más rígida y esto se equilibra con una mayor cantidad de asfalto que le genere mejor flexibilidad.

Esta mezcla también presenta los valores más altos en el parámetro del flujo lo que indica la deformación total que experimentó la probeta desde el inicio de la aplicación de



carga hasta el momento en que se produce la falla. Los altos valores del flujo Marshall hacen que disminuya la rigidez y se cumplan los valores establecidos en la tabla IDU 510.9 para un tránsito T4-T5.

Esta mezcla presenta menor vacíos con aire a causa de la condición del caucho, el cual al enfriarse la mezcla se expande acomodándose en estos vacíos, es por esto por lo que se utiliza una granulometría discontinua.

Las mezclas MD12 y MD20 utilizan un asfalto 60/70 el cuál se maneja en vías de altos tránsitos (T4-T5), y se observa el cumplimiento de la rigidez Marshall en la tabla IDU 510.9.

Tabla 133. IDU Tabla 510.9

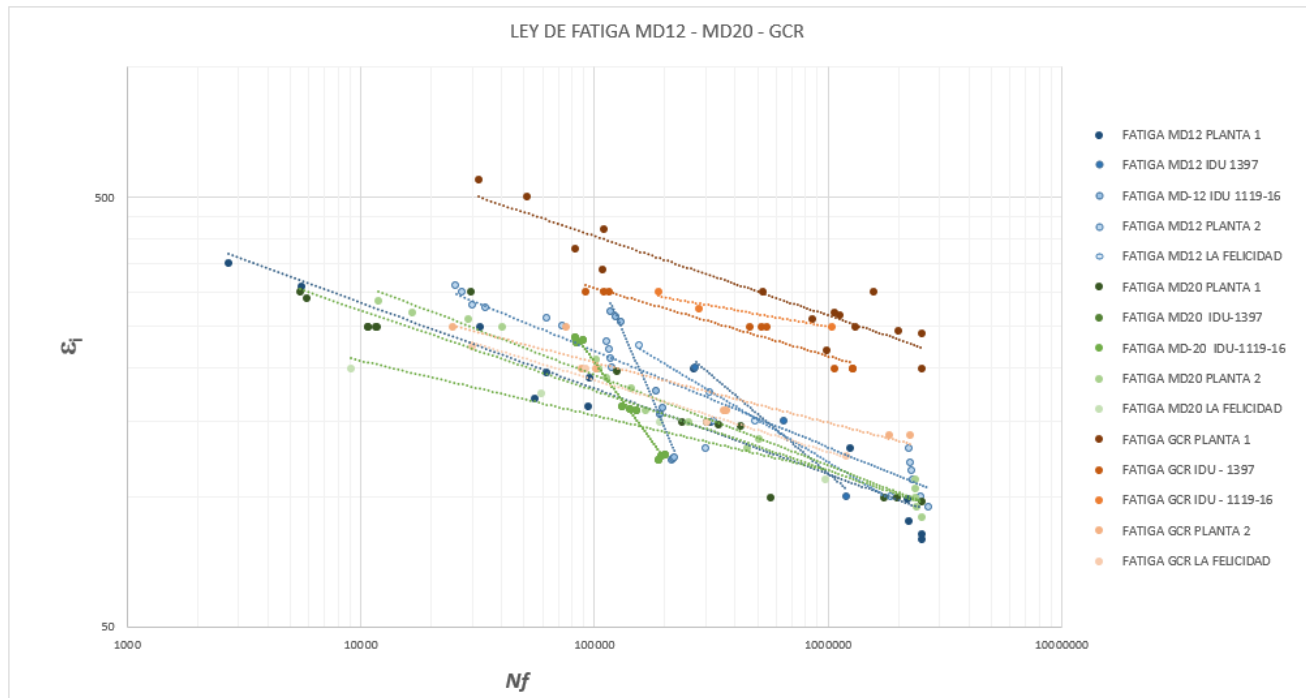
| Característica                    | Norma de Ensayo | Mezclas Densas, Semidensas y Gruesas |           |           | Mezcla Alto Módulo |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-----------|-----------|--------------------|
|                                   |                 | Categoría de Tránsito                |           |           |                    |
|                                   |                 | T0 - T1                              | T2 – T3   | T4-T5     |                    |
| Relación Estabilidad / Flujo      | INV E-748-07    | 200 a 400                            | 300 a 500 | 300 a 600 | -                  |
| Índice de película de asfalto, μm | INV E-741-07    | 7.5                                  |           |           |                    |

*Nota:* Criterios de comprobación del diseño volumétrico de la fórmula de trabajo. Fuente: IDU

### Ensayo de ley de fatiga

Se determinó la ley de fatiga por medio de deformación controlada, en donde la muestra es sometida a varios ciclos de carga con deformación constante y se halla el esfuerzo el cual varia con el tiempo. Se graficaron todos los ensayos de fatiga en la misma grafica para identificar la tendencia de cada tipo de mezcla asfáltica, como se muestra a continuación:

Gráfico 56. Resultados de ensayo de fatiga de las mezclas asfálticas.



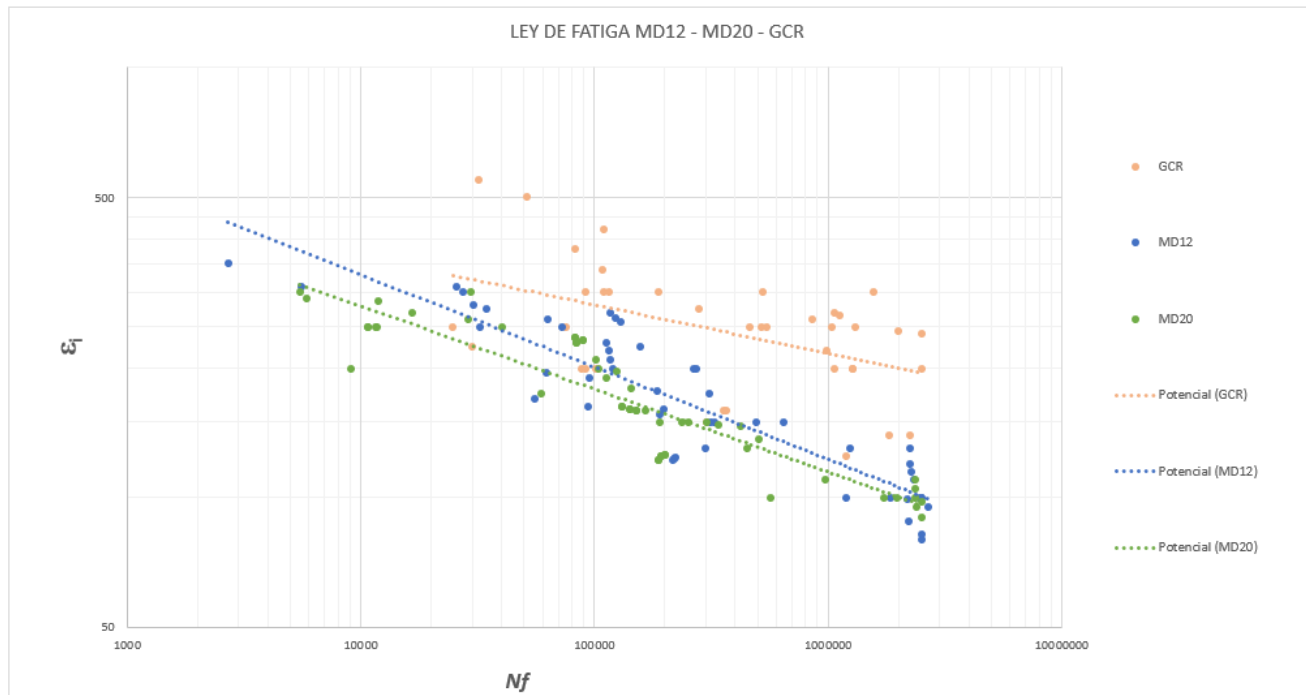
De acuerdo con la información que se muestra en el gráfico, las mezclas asfálticas GCR de los diferentes contratos presentan una gran variabilidad verticalmente referente a la deformación obtenida, pero son puntos cercanos entre sí en relación con el número de repetición de carga.

En las mezclas MD20 y MD12 sucede lo contrario, son puntos cercanos verticalmente, pero distantes en cuanto al número de repeticiones de carga, a su vez tienen datos con una deformación muy alta para un bajo número de repeticiones de carga.

Tabla 134. Datos específicos del ensayo de fatiga.

| Mezcla | Planta / Contrato | $E_6$ | S      | Ecuación                             |
|--------|-------------------|-------|--------|--------------------------------------|
| GCR    | PLANTA 1          | 265   | -0,185 | $\varepsilon_i = 3395Nf^{-0,185}$    |
|        | IDU 1397 - 17     | 213   | -0,159 | $\varepsilon_i = 1914,5Nf^{-0,159}$  |
|        | IDU 1119 - 16     | 213   | -0,098 | $\varepsilon_i = 964,95Nf^{-0,098}$  |
|        | PLANTA 2          | 149   | -0,140 | $\varepsilon_i = 1037,9Nf^{-0,140}$  |
|        | LA FELICIDAD      | 128   | -0,167 | $\varepsilon_i = 1287Nf^{-0,167}$    |
| MD12   | PLANTA 1          | 113   | -0,199 | $\varepsilon_i = 1770,9Nf^{-0,199}$  |
|        | IDU 1397 - 17     | 114   | -0,458 | $\varepsilon_i = 63501Nf^{-0,458}$   |
|        | IDU 1119 - 16     | 19    | -1,257 | $\varepsilon_i = 7E + 08Nf^{-1,257}$ |
|        | PLANTA 2          | 131   | -0,224 | $\varepsilon_i = 2887Nf^{-0,224}$    |
|        | LA FELICIDAD      | 121   | -0,326 | $\varepsilon_i = 10932Nf^{-0,326}$   |
| MD20   | Planta 1          | 115   | -0,186 | $\varepsilon_i = 1507,5Nf^{-0,186}$  |
|        | IDU 1397 - 17     | 37    | -0,751 | $\varepsilon_i = 1173793Nf^{-0,751}$ |
|        | IDU 1119 - 16     | 37    | -0,751 | $\varepsilon_i = 1E + 06Nf^{-0,751}$ |
|        | PLANTA 2          | 119   | -0,210 | $\varepsilon_i = 2167,4Nf^{-0,210}$  |
|        | LA FELICIDAD      | 116   | -0,127 | $\varepsilon_i = 671,11Nf^{-0,127}$  |

Gráfico 57. Comparación de la ley de fatiga entre las mezclas asfálticas.



En la gráfica 57 se observan los resultados del laboratorio de fatiga para las tres mezclas ensayadas. La resistencia a la fatiga aumenta en las mezclas que tienen un mayor contenido de asfalto y utilizan un asfalto más duro, lo cual se ve reflejado en la mezcla asfáltica GCR, donde su línea de tendencia tiene una pendiente menor (-0.113) a la de la mezcla Md12 y Md20 (-0.215 y -0.193 respectivamente), representando qué tan rápido se deteriora la mezcla con la repetición de carga.

En la tabla 132 se observan los valores de la deformación inicial para 1'000.000 de ciclos ( $E_6$ ) y la pendiente de cada uno de los ensayos de fatiga. Los cuáles fueron clasificados por mezclas y nuevamente se evidencia la baja pendiente de la mezcla GCR.

### **Ensayo de susceptibilidad al agua (Adherencia al agua)**

Se determinó el porcentaje de la relación de resistencia de a la tracción del pavimento mediante el ensayo de tracción indirecta, el cual somete a una briqueta de pavimento tipo Marshall a un esfuerzo vertical siendo aplicado por la sección transversal. Se graficaron todos los ensayos de susceptibilidad al agua en la misma grafica para identificar claramente el comportamiento de las mezclas asfálticas, como se muestra en las siguientes graficas:

Gráfico 58. Comparación ensayo de susceptibilidad al agua entre mezclas.

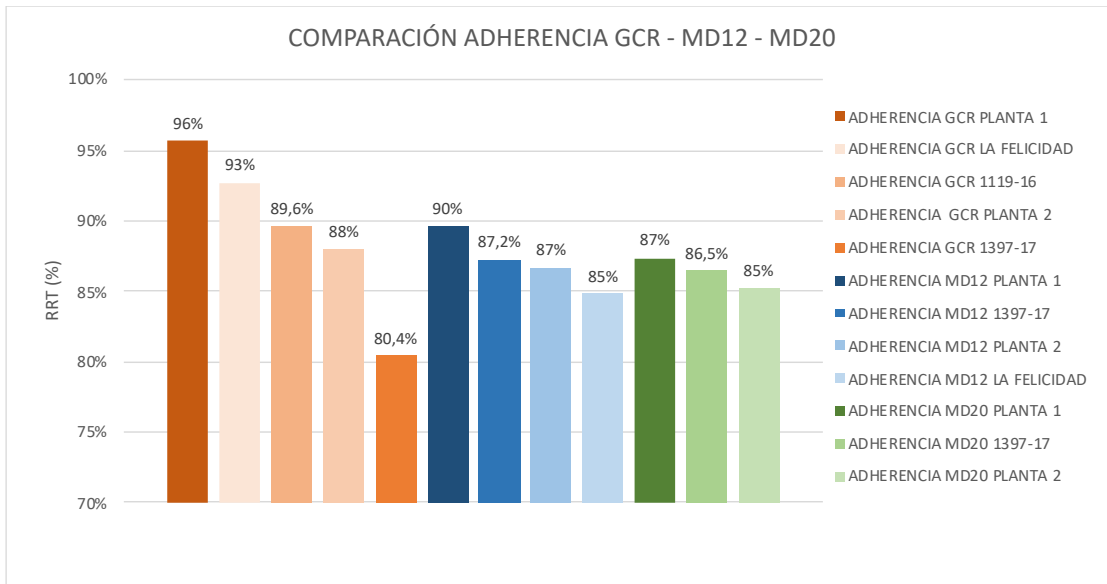
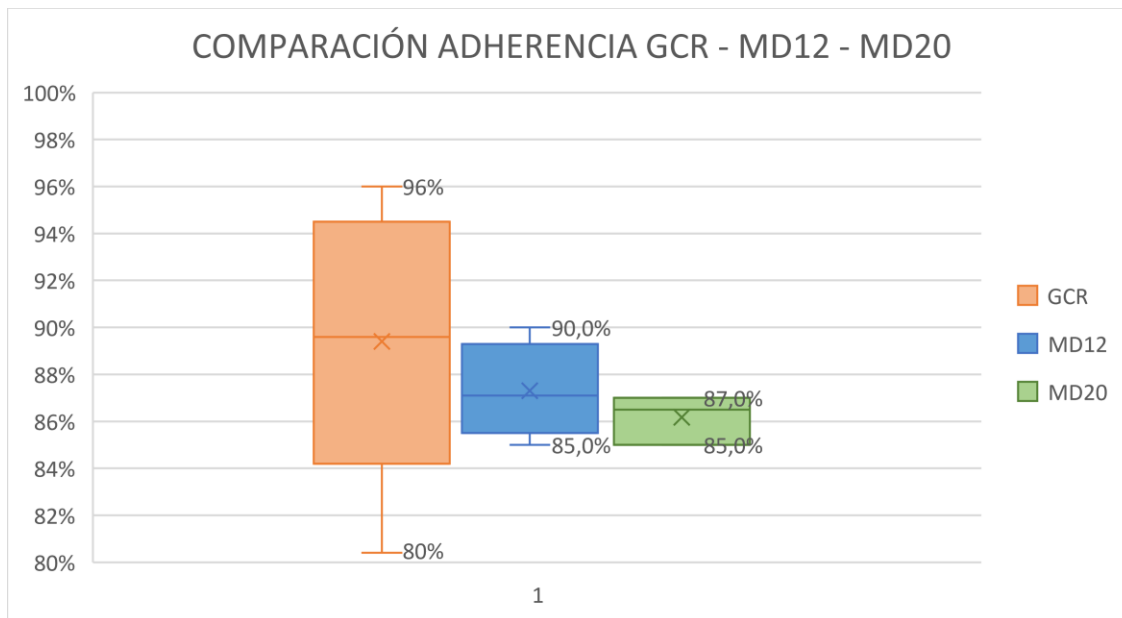


Gráfico 59. Cajas y bigotes, ensayo de susceptibilidad al agua.



Como se puede inferir mediante el grafico todas las mezclas se encuentran dentro del rango favorable que según la sección del IDU 510.3.3 debe ser de mínimo el 80 % por lo cual

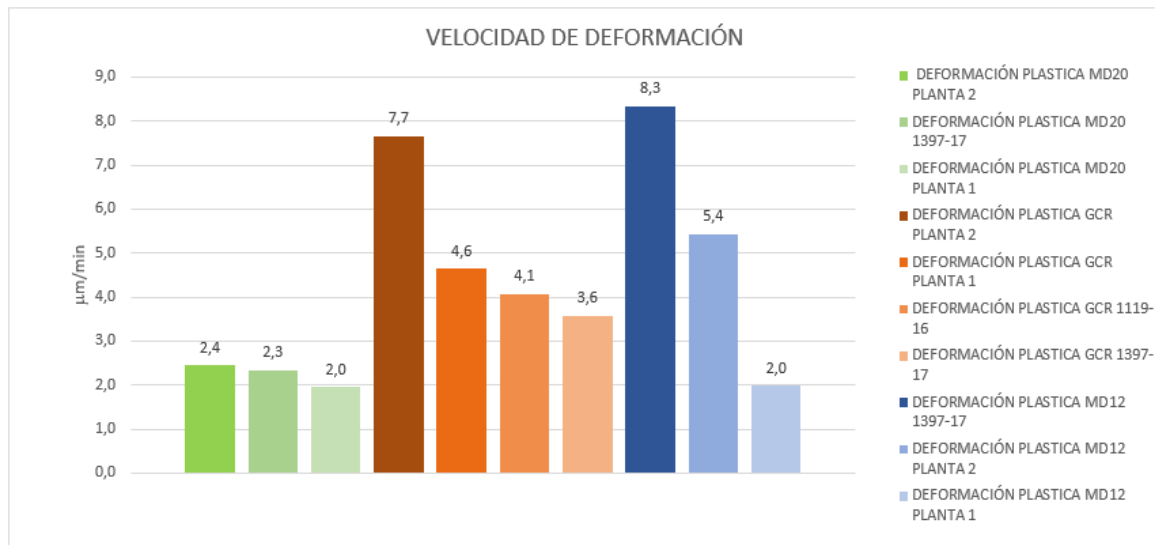
indica que las mezclas analizadas **presentan baja susceptibilidad al daño inferido por agua**, lo que indica que se genera menor desprendimiento de agregado.

Además, se observa que hay una gran variabilidad de los datos en la mezcla GCR, pero esto se debe a un dato atípico el cual genera esta distancia entre datos, pero se puede percibir mediante los resultados de laboratorio mostrados anteriormente, que el tipo de mezcla GCR supera en su %RRT a las mezclas de MD12 y MD20.

### Ensayo de deformación plástica (Ahuellamiento)

Se determinó mediante la pista de ensayo de laboratorio, el cual consiste en medir la deformación que se produce en una probeta rectangular de mezcla asfáltica al paso de una rueda cargada que debe aplicar 700N de carga, de 20 cm de diámetro y 5 cm de anchura, provista de una banda de goma dura de 2 cm de grosor, la cual genera un movimiento repetitivo en la probeta por 120 minutos, la deformación plástica se determinó para cada una de las mezclas y se graficaron como se muestran a continuación:

Gráfico 60. Velocidad de deformación plástica de las mezclas asfálticas.



Como se muestra en el gráfico la mezcla que tiene un mejor comportamiento en función a la velocidad última entre los rangos de 105 – 120 min es el MD20 esto se debe a que tiene agregados de mayor tamaño que la MD12 y menor contenido de asfalto que la GCR, por eso muestra un mejor comportamiento en su velocidad ultima a comparación de las otras dos mezclas, las cuales tienen datos muy variables, dado que tiene el valor máximo y el valor mínimo, esto nos indica que la producción de la mezcla no es lo suficientemente estandarizada.

La mezcla GCR tiene un dato atípico que hace que varíe y se amplíe el rango de las velocidades, pero en lo general presenta una velocidad apropiada, la cual la hace que sea una mezcla susceptiblemente baja al ahuellamiento en tiempo de uso.

Es importante tener en cuenta que si se deseara realizar un análisis cuantitativo con respecto a este ensayo de laboratorio no se debe tener en cuenta el dato atípico (velocidad de deformación “Planta 2”) presentado en la mezcla GCR.

Gráfico 61. Intervalo de deformación total de las mezclas.

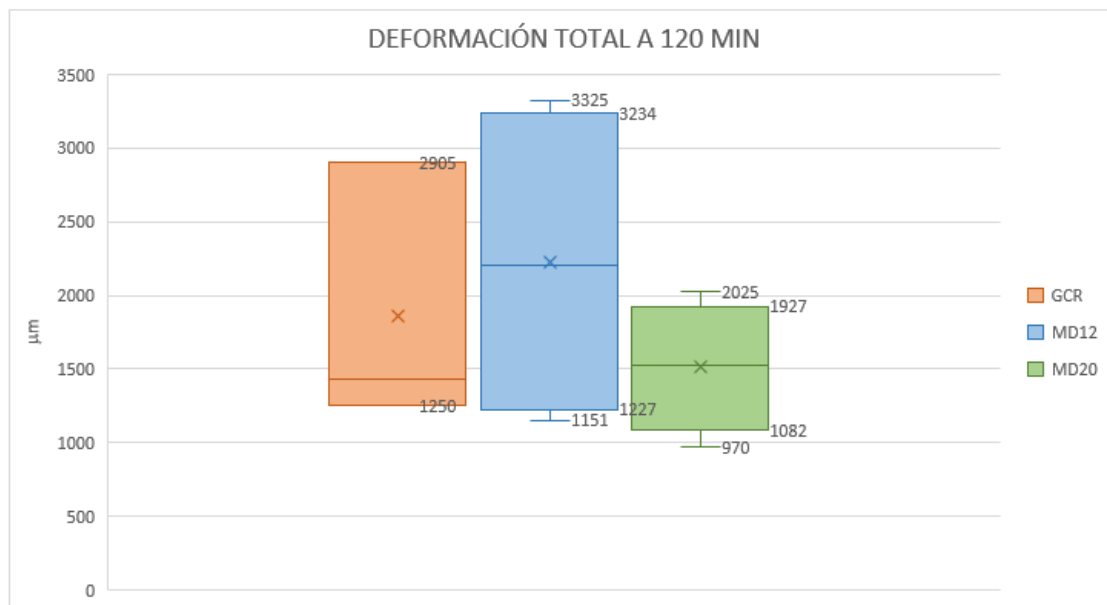
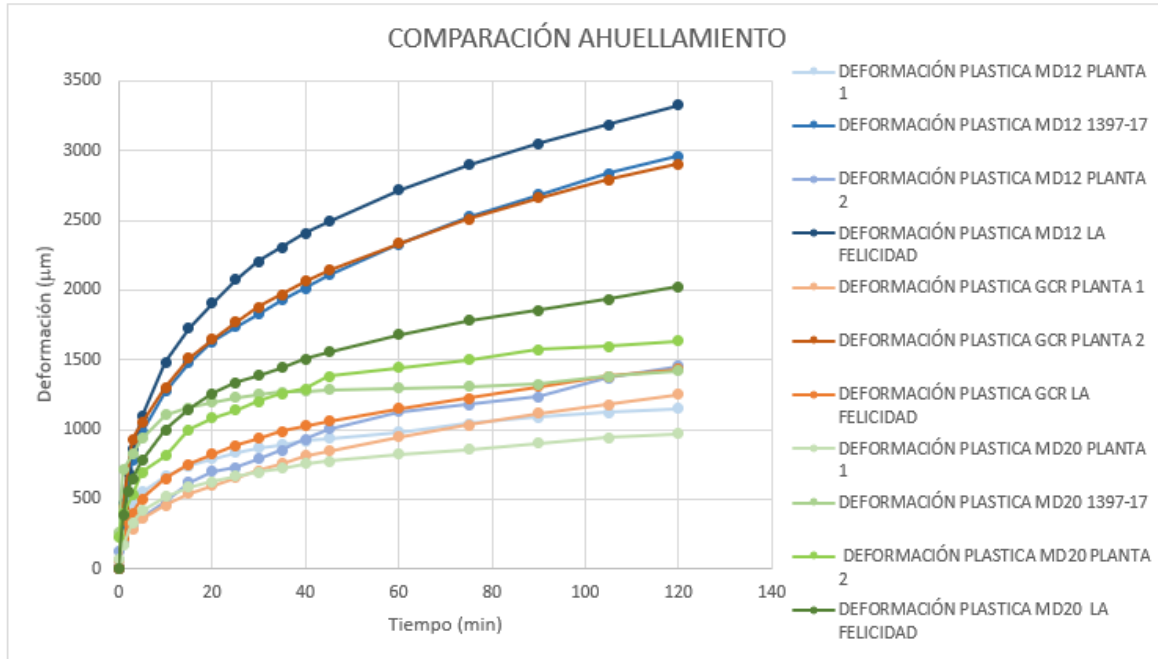


Gráfico 62. Comparación de resultados de ensayo de deformación plástica de las mezclas asfálticas.



El ahuellamiento presentado en las anteriores graficas determinan que las mezclas que mejor se comportan ante la deformación plástica son la GCR y MD20 esto se debe en parte a su tamaño máximo nominal. Pero la mezcla de GCR se ve afectada por su granulometría discontinua la cual no le genera tanta fricción, lo que hace que esta se vea más afectada a las deformaciones presentadas en el ensayo de ahuellamiento.

### Ensayo de módulos (Resiliente - Dinámico)

En el **módulo resiliente** el tipo y la duración de las cargas usadas simulan lo que realmente ocurre en el campo. Por esta razón se tomaron cuatro puntos clave para analizar, dos temperaturas (20°C y 40°C) y dos frecuencias (5 Hz y 8 Hz), tal como se muestran a continuación:

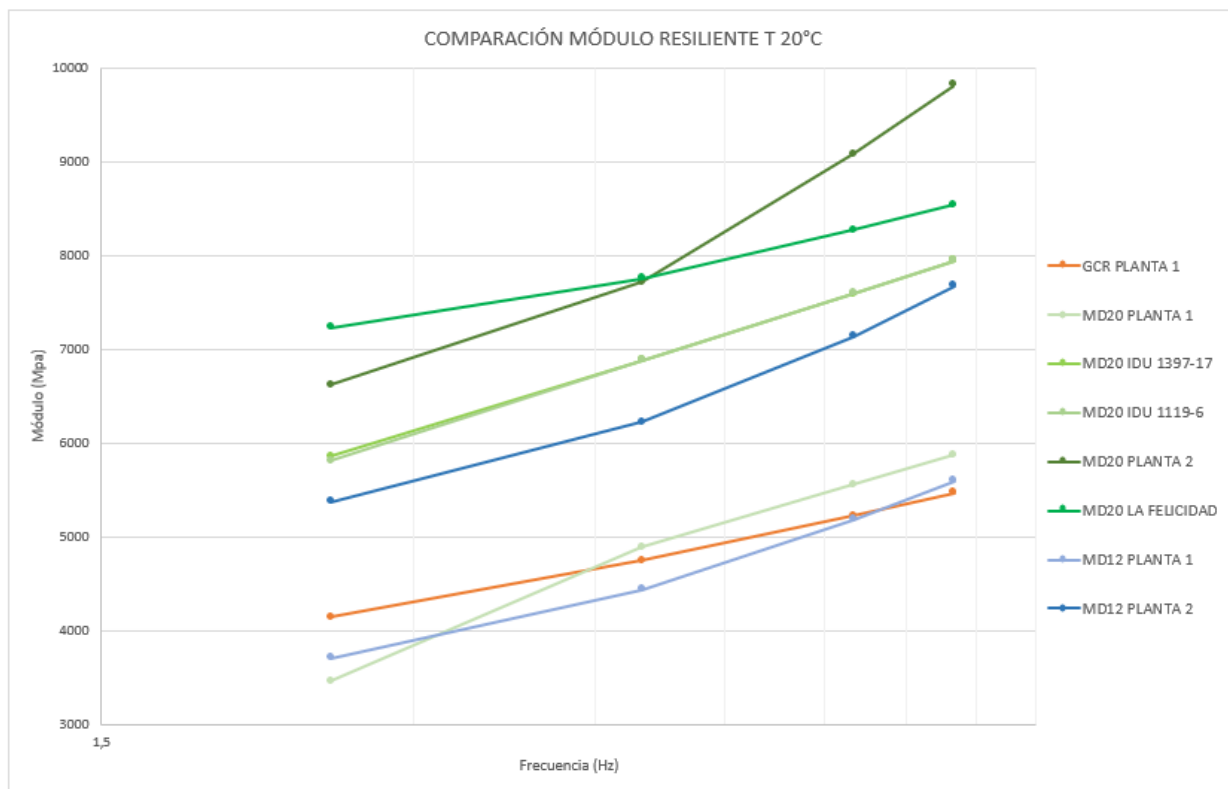


Tabla 135. Resultados de módulo resiliente de las mezclas asfálticas.

| MEZCLA | PLANTA / CONTRATO | MÓDULO RESILIENTE (Mpa) |      |      |      |
|--------|-------------------|-------------------------|------|------|------|
|        |                   | 20°C                    |      | 40°C |      |
|        |                   | 5 Hz                    | 8 Hz | 5 Hz | 8 Hz |
| GCR    | PLANTA 1          | 4750                    | 5227 | 782  | 919  |
|        | PLANTA 1          | 4891                    | 5558 | 726  | 859  |
| MD20   | IDU 1397-17       | 6880                    | 7589 | 2119 | 2540 |
|        | IDU 1119-16       | 6880                    | 7602 | 2179 | 2521 |
|        | PLANTA 2          | 7715                    | 9082 | 1306 | 1654 |
|        | LA FELICIDAD      | 7761                    | 8273 | 2613 | 2965 |
| MD12   | PLANTA 1          | 4439                    | 5181 | 410  | 483  |
|        | PLANTA 2          | 6225                    | 7135 | 1128 | 1506 |

A partir de esta información se realiza un gráfico donde se observa el comportamiento del módulo resiliente de las medidas de análisis establecidas (20°C y 5 Hz).

Gráfico 63. Módulo resiliente de las mezclas asfálticas para 20°C.



Para una temperatura de 20°C se tomaron cuatro puntos específicos de frecuencia 2.5, 5, 8, y 10 Hz. La mezcla GCR arroja valores más bajos debido a que no es una mezcla tan rígida y por el alto contenido de asfalto que tiene. Mientras que la mezcla MD20 es la mezcla que presenta valores más altos en los módulos, lo cual va relacionado con el diseño preliminar de la mezcla.

En este ensayo la carga aplicada generalmente es pequeña, por lo tanto, es una prueba no destructiva e implica que a medida que aumente la frecuencia aumenta el módulo.

Gráfico 64. Módulo resiliente de las mezclas asfálticas a 5 Hz.



Cuando se cambian las variables, y se grafica respecto a la temperatura, se observa que a medida que aumenta la temperatura el módulo disminuye, esto se debe a que cuando la mezcla presenta altas temperaturas tiende a ablandarse y resistir menos.

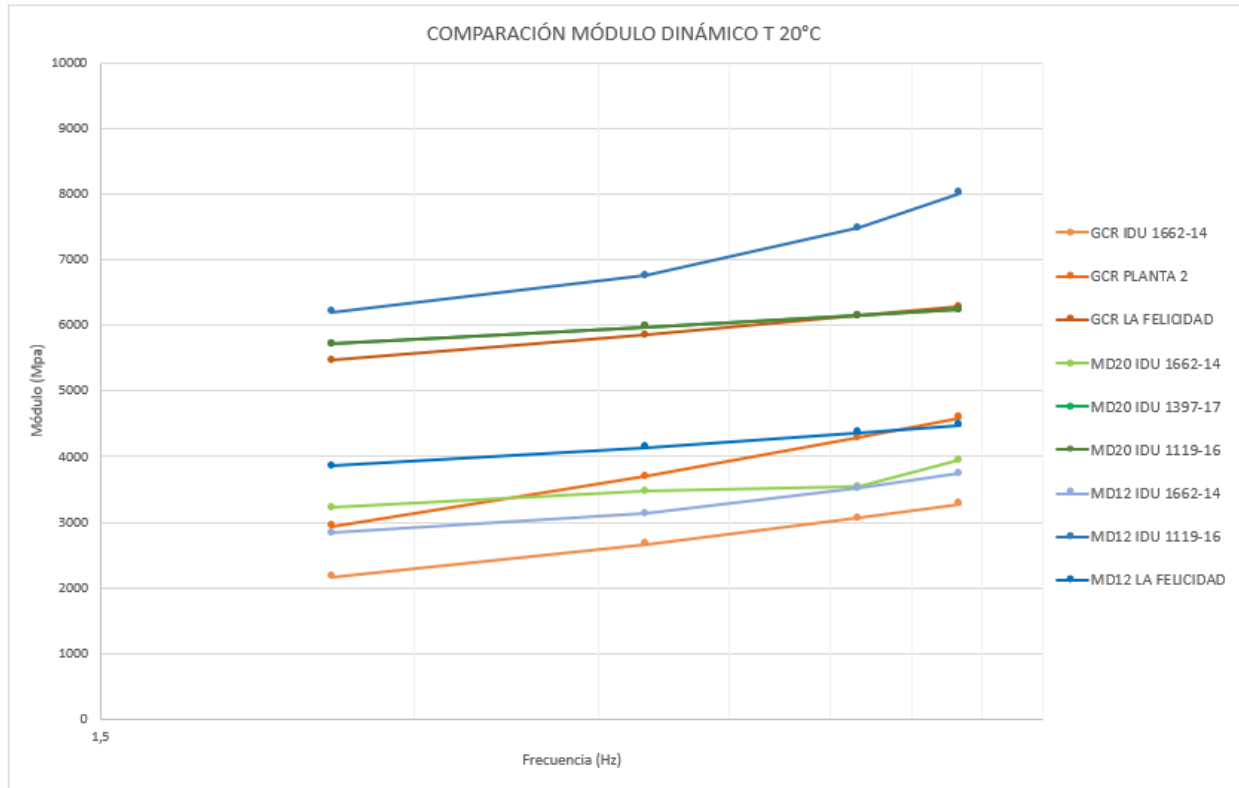
Los resultados de las mezclas MD20 son los valores más elevados de los módulos, encontrándose en un rango de 5000MPa a 8000MPa para una temperatura de 25°C, mientras que la mezcla GCR no supera los 6000MPa para esta misma temperatura.

El **módulo dinámico** en las mezclas asfálticas depende de la temperatura de la mezcla y el tiempo de aplicación de la carga, teniendo en cuenta la susceptibilidad térmica y las cargas de los vehículos.

Tabla 136. Resultados de módulo dinámico de las mezclas asfálticas.

| MÓDULO DINÁMICO (Mpa) |                   |      |      |      |      |
|-----------------------|-------------------|------|------|------|------|
| MEZCLA                | PLANTA / CONTRATO | 20°C |      | 40°C |      |
|                       |                   | 5 Hz | 8 Hz | 5 Hz | 8 Hz |
| GCR                   | IDU 1662-14       | 2664 | 3067 | 711  | 824  |
|                       | PLANTA 2          | 3696 | 4286 | 989  | 1127 |
|                       | LA FELICIDAD      | 5858 | 6147 | 1904 | 2104 |
| MD20                  | IDU 1662-14       | 3474 | 3541 | 80   | 179  |
|                       | IDU 1397-17       | 5979 | 6153 | 2111 | 2295 |
|                       | IDU 1119-16       | 5979 | 6153 | 2111 | 2295 |
| MD12                  | IDU 1662-14       | 3132 | 3518 | 205  | 279  |
|                       | IDU 1119-16       | 6761 | 7489 | 2938 | 3269 |
|                       | LA FELICIDAD      | 4141 | 4366 | 1788 | 1939 |

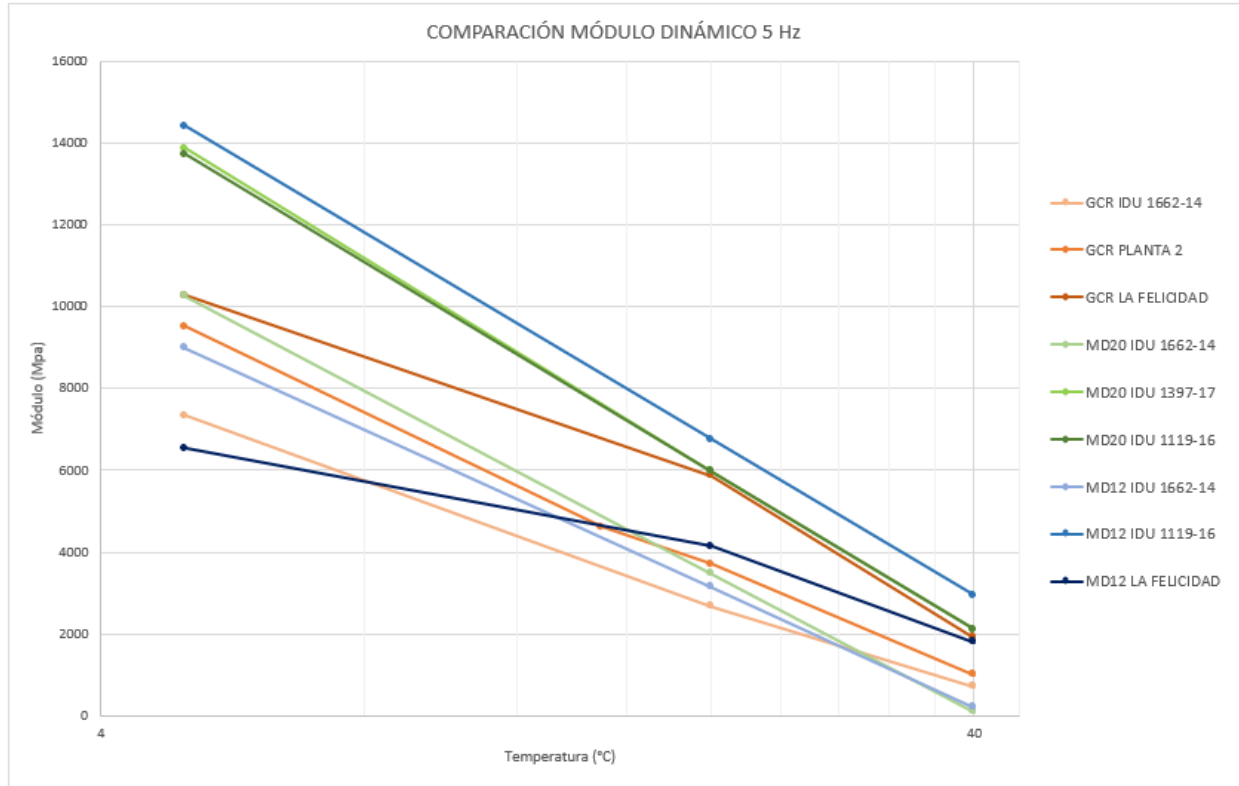
Gráfico 65. Módulo dinámico de las mezclas asfálticas para 20°C



Para visualizar el comportamiento del módulo dinámico en las mezclas asfálticas se elaboró el anterior gráfico a partir del cual se puede conocer el módulo para diferentes frecuencias a una temperatura de 20°C.

El efecto del aumento de la frecuencia de carga se evidencia en el aumento del módulo dinámico, este comportamiento es evidente a temperaturas bajas, porque en el caso de temperaturas altas se puede decir que el módulo dinámico tiene una variación mínima.

Gráfico 66. Módulo dinámico de las mezclas asfálticas para 5 Hz.



En el anterior gráfico se presenta la curva de módulo dinámico variando su temperatura para cada una de las mezclas asfálticas de los diferentes proveedores, teniendo una tendencia inversamente proporcional, a mayor temperatura menor módulo dinámico de la mezcla, es decir, más blando o menos viscoso.

### Diseño de la estructura del pavimento.

Los diseños de pavimentos fueron calculados mediante dos metodologías, la primera metodología es la AASHTO 93, para la cual solo se calcularon las estructuras para la mezcla GCR y así obtener para cada parámetro una estructura, esta misma estructura se puso a prueba mediante el segundo método, el método RACIONAL, al cambiarle la capa de rodadura con

las dos mezclas convencionales (MD12 y MD20), Tiendo el espesor igual en cada capa se podría comprobar el comportamiento y la eficiencia, de la mezcla GCR ante las mezclas convencionales.

Para realizar los diseños de las estructuras de pavimentos se tuvieron dos escenarios de CBR, un escenario con CBR de 4% y el segundo con un CBR de 2 % esto con fin de simular lo que se encuentra en la subrasante de Bogotá.

En cada escenario se diseñó una estructura de pavimento para los siguientes tránsitos,  $N_T$ : 7'500.000,  $N_T$ : 3'000.000,  $N_T$ : 1'500.000,  $N_T$ : 200.000.

### **Método AASHTO 93**

Para diseñar la estructura de pavimento para la mezcla GCR mediante el método AASHTO 93, se usaron los parámetros anteriormente mencionados, dos escenarios de CBR (4% y 2%) y los siguientes tránsitos  $N_T$ : 7'500.000,  $N_T$ : 3'000.000,  $N_T$ : 1'500.000,  $N_T$ : 200.000.

Los resultados de las estructuras se pueden observar en las siguientes tablas.

Tabla 137. Diseño de las estructuras de pavimento (CBR 4%) mediante el método AASHTO 93.

| CBR (%) 4,0 |                                                                   |              |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|--------------|
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 7,5 e6    | Mezcla asfáltica T4-T5 Sección IDU 560-11                         | 18,0         |
|             | Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11             | 20,0         |
|             | Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11 | 35,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>73,0</b>  |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 3,0 e6    | Mezcla asfáltica T4-T5 Sección IDU 560-11                         | 15,0         |
|             | Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11             | 20,0         |
|             | Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11 | 30,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>65,0</b>  |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 1,5 e6    | Mezcla asfáltica T2-T3 Sección IDU 560-11                         | 14,0         |
|             | Base granular Clase B T2-T3 Sección IDU 400-11                    | 20,0         |
|             | Subbase granular Clase B T2-T3 Sección IDU 400-11                 | 25,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>59,0</b>  |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 2,0 e5    | Mezcla asfáltica T0-T1 Sección IDU 560-11                         | 10,0         |
|             | Base granular Clase B T0-T1 Sección IDU 400-11                    | 15,0         |
|             | Subbase granular Clase B T0-T1 Sección IDU 400-11                 | 20,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>45,0</b>  |

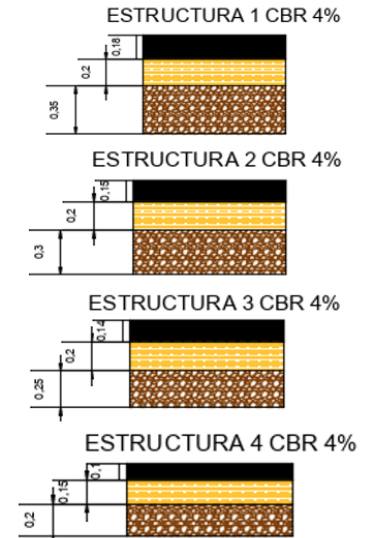
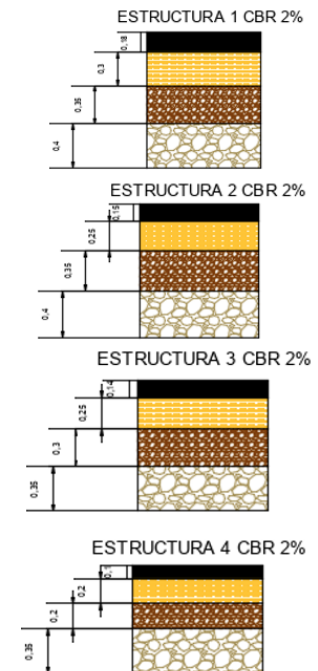


Tabla 138. Diseño de las estructuras de pavimento (CBR 2%) mediante el método AASHTO 93.

| CBR (%) 2,0 |                                                                   |              |
|-------------|-------------------------------------------------------------------|--------------|
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 7,5 e6    | Mezcla asfáltica T4-T5 Sección IDU 560-11                         | 18,0         |
|             | Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11             | 30,0         |
|             | Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11 | 35,0         |
|             | Mejoramiento de la subrasante con rajón y sello Sección 321-11    | 40,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>123,0</b> |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 3,0 e6    | Mezcla asfáltica T4-T5 Sección IDU 560-11                         | 15,0         |
|             | Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11             | 25,0         |
|             | Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11 | 35,0         |
|             | Mejoramiento de la subrasante con rajón y sello Sección 321-11    | 40,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>115,0</b> |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 1,5 e6    | Mezcla asfáltica T2-T3 Sección IDU 560-11                         | 14,0         |
|             | Base granular Clase B T2-T3 Sección IDU 400-11                    | 25,0         |
|             | Subbase granular Clase B T2-T3 Sección IDU 400-11                 | 30,0         |
|             | Mejoramiento de la subrasante con rajón y sello Sección 321-11    | 35,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>104,0</b> |
|             | CAPA                                                              | ESPEJOR (cm) |
| N 2,0 e5    | Mezcla asfáltica T0-T1 Sección IDU 560-11                         | 10,0         |
|             | Base granular Clase B T0-T1 Sección IDU 400-11                    | 20,0         |
|             | Subbase granular Clase B T0-T1 Sección IDU 400-11                 | 20,0         |
|             | Mejoramiento de la subrasante con rajón y sello Sección 321-11    | 35,0         |
|             | <b>TOTAL</b>                                                      | <b>85,0</b>  |



### Método Racional

En el método racional se utilizaron los espesores obtenidos anteriormente para cada diseño, clasificándolo por su CBR y el número de tránsito. Adicional a esto, se emplearon las ecuaciones de Shell, y el módulo dinámico de cada mezcla asfáltica ( $S_{mix}$ ) que se obtuvieron de la recolección de datos, junto a una confiabilidad superior al 85%.

Con este método se puede verificar la vida útil del pavimento respecto a las admisibilidades propias de cada capa de la estructura, las cuales fueron analizadas en el programa DOSBox, obteniendo la deformación por tensión, esfuerzo por tracción, deformación vertical y esfuerzo en cada extremo de las capas.

Cuando la  $\epsilon_{t,adm}$  es mayor al  $\epsilon_{t,act}$  significa que es viable el diseño de la estructura, debido a que soporta la misma o mayor cantidad de transito con el que fue diseñado, tal como se muestra en las siguientes tablas:

Tabla 139. Resultados de diseño de estructura de pavimentos por método racional con CBR (%) 4,0

| CBR (%) 4,0      |                    |                    |             |           |                    |                    |             |           |
|------------------|--------------------|--------------------|-------------|-----------|--------------------|--------------------|-------------|-----------|
| N 7,5 e6 (K 2,0) |                    |                    |             |           | N 3,0 e6 (K 3,3)   |                    |             |           |
|                  | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           |
| GCR              | 1,76E-04           | 1,86E-04           | 12.345.617  | Cumple    | 2,12E-04           | 2,19E-04           | 3.924.165   | Cumple    |
| MD12             | 1,61E-04           | 9,39E-05           | 582.815     | No cumple | 1,94E-04           | 1,27E-04           | 397.414     | No cumple |
| MD20             | 1,52E-04           | 9,24E-05           | 508.669     | No cumple | 1,84E-04           | 1,20E-04           | 298.820     | No cumple |
| N 1,5 e6 (K 2,0) |                    |                    |             |           | N 2,0 e5 (K 2,0)   |                    |             |           |
|                  | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           |
| GCR              | 2,26E-04           | 2,23E-04           | 1.350.480   | No cumple | 3,55E-04           | 2,80E-04           | 24.826      | No cumple |
| MD12             | 2,08E-04           | 1,32E-04           | 173.117     | No cumple | 3,28E-04           | 2,02E-04           | 19.992      | No cumple |
| MD20             | 1,97E-04           | 1,24E-04           | 125.217     | No cumple | 3,11E-04           | 1,81E-04           | 10.612      | No cumple |



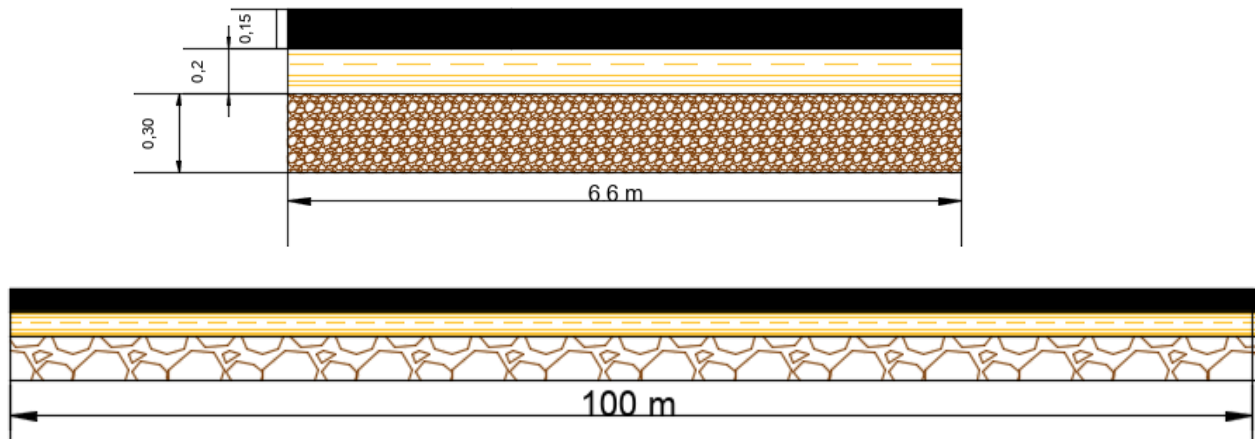
Tabla 140. Resultados de diseño de estructura de pavimentos por método racional con CBR (%) 2,0

| CBR (%) 2,0      |                    |                    |             |           |                    |                    |             |           |
|------------------|--------------------|--------------------|-------------|-----------|--------------------|--------------------|-------------|-----------|
| N 7,5 e6 (K 2,0) |                    |                    |             |           | N 3,0 e6 (K 2,0)   |                    |             |           |
|                  | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           |
| GCR              | 1,64E-04           | 1,86E-04           | 23.063.132  | Cumple    | 1,98E-04           | 2,07E-04           | 4.353.471   | Cumple    |
| MD12             | 1,51E-04           | 9,39E-05           | 789.798     | No cumple | 1,82E-04           | 1,14E-04           | 325.973     | No cumple |
| MD20             | 1,43E-04           | 9,24E-05           | 707.489     | No cumple | 1,73E-04           | 1,09E-04           | 252.719     | No cumple |
| N 1,5 e6 (K 2,0) |                    |                    |             |           | N 2,0 e5 (K 2,0)   |                    |             |           |
|                  | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           | $\epsilon_{t,act}$ | $\epsilon_{t,adm}$ | $N_{t,adm}$ |           |
| GCR              | 2,17E-04           | 2,23E-04           | 1.934.958   | Cumple    | 3,13E-04           | 2,80E-04           | 75.656      | No cumple |
| MD12             | 2,00E-04           | 1,32E-04           | 208.481     | No cumple | 2,90E-04           | 2,02E-04           | 35.833      | No cumple |
| MD20             | 1,90E-04           | 1,24E-04           | 152.264     | No cumple | 2,77E-04           | 1,81E-04           | 19.842      | No cumple |

### Costo – Beneficio

Para poder observar el costo entre cada mezcla se eligieron las estructuras con los parámetros de tránsito de  $N_T$ : 3'000.000, CBR 4% y CBR 2%, las estructuras presentan las mismas dimensiones y el mismo material en sus capas, a excepción de la carpeta asfáltica, con el fin de estimar la variación de los costos en un ejemplo a escala real, de una vía de 100 metros de longitud, con un ancho de 6,6 metros y la estructura diseñada.

Ilustración 7. Sección transversal y sección longitudinal del ejemplo vial (CBR 4%)



A continuación, se mostrará mediante una tabla la diferencia que se presenta entre las tres mezclas para el ejemplo.

*Tabla 141.* Costos de la vía según su estructura. (Nt: 3.500.000 CBR 4%)

| GCR                                                                                   |                 |                  |            |                   |                        |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|------------------------|
| CAPA                                                                                  | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA (100 m X 6,6<br>m) |
| Mezcla asfáltica caliente con asfalto<br>modificado con GCR // T4-T5 Sección IDU 560- | 15,0            | 0,15             | \$ 924.986 | \$ 138.748        | \$ 91.573.614          |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección<br>IDU 400-11                              | 20,0            | 0,2              | \$ 128.548 | \$ 25.710         | \$ 16.968.336          |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-<br>Gr2 Sección IDU 400-11                 | 30,0            | 0,3              | \$ 122.360 | \$ 36.708         | \$ 24.227.280          |
| <b>TOTAL</b>                                                                          | 65,0            |                  |            | \$ 201.166        | \$ 132.769.230         |

| MD12                                                                            |                 |                  |            |                   |               |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|---------------|
| CAPA                                                                            | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA           |
| Mezcla asfáltica densa en caliente MD12 con<br>cemento asfáltico 60-70 // T4-T5 | 15,0            | 0,15             | \$ 543.269 | \$ 81.490         | \$ 53.783.631 |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección<br>IDU 400-11                        | 20,0            | 0,2              | \$ 128.548 | \$ 25.710         | \$ 16.968.336 |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-<br>Gr2 Sección IDU 400-11           | 30,0            | 0,3              | \$ 122.360 | \$ 36.708         | \$ 24.227.280 |
| <b>TOTAL</b>                                                                    | 65,0            |                  |            | \$ 143.908        | \$ 94.979.247 |

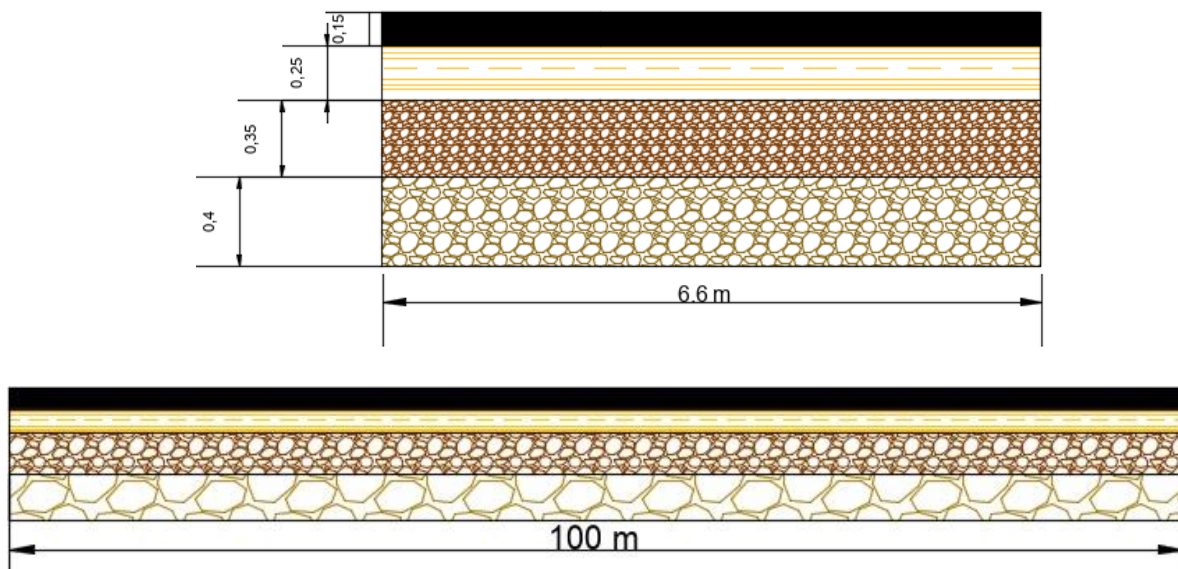
| MD20                                                                              |                 |                  |            |                   |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|---------------|
| CAPA                                                                              | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA           |
| Mezcla asfáltica densa en caliente MD20 con<br>cemento asfáltico 60 - 70 // T4-T5 | 15,0            | 0,15             | \$ 585.494 | \$ 87.824         | \$ 57.963.906 |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección<br>IDU 400-11                          | 20,0            | 0,2              | \$ 128.548 | \$ 25.710         | \$ 16.968.336 |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-<br>Gr2 Sección IDU 400-11             | 30,0            | 0,3              | \$ 122.360 | \$ 36.708         | \$ 24.227.280 |
| <b>TOTAL</b>                                                                      | 65,0            |                  |            | \$ 150.242        | \$ 99.159.522 |

Tabla 142. Relación costo beneficio por año de vida útil (Nt: 3.500.000 CBR 4%)

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS - CAPA ASFÁLTICA POR AÑO DE VIDA ÚTIL |                      |                                                         |                      |                              |                  |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|
| MEZCLA ASFÁLTICA                                                     | VALOR CAPA ASFÁLTICA | NÚMERO DE REPETICIONES ADMISIBLES - ANÁLISIS POR FATIGA | VIDA ÚTIL POR FATIGA | VIDA ÚTIL POR FATIGA EN AÑOS | COSTO/AÑO        |
| GCR                                                                  | \$ 91.573.614        | 3.924.165                                               | 130,81%              | 13,08                        | \$ 7.000.746,65  |
| MD12                                                                 | \$ 53.783.631        | 397.414                                                 | 13,25%               | 1,73                         | \$ 31.038.645,17 |
| MD 20                                                                | \$ 57.963.906        | 298.820                                                 | 9,96%                | 1,30                         | \$ 44.488.005,80 |

De acuerdo con los resultados obtenidos se muestra que la mezcla GCR tiene una vida útil por fatiga 8 a 10 veces mayor en comparación de las mezclas convencionales (MD12 y MD20). Por lo tanto, aun cuando su costo es un 35% a 40% superior, esta inversión se justifica porque con la mezcla GCR se estaría aumentando de 4 a 6 veces la durabilidad a la fatiga por cada peso invertido, con relación a las mezclas MD12 y MD20.

Ilustración 8. Sección transversal y sección longitudinal del ejemplo vial (CBR 2%)



A continuación, se mostrará mediante una tabla la diferencia que se presenta entre las tres mezclas para el ejemplo.

*Tabla 143.* Costos de la vía según su estructura. (Nt: 3.500.000 CBR 2%)

| GCR                                                                                  |                 |                  |            |                   |                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|------------|-------------------|-----------------------|
| CAPA                                                                                 | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA (100 m X 6,6 m)   |
| Mezcla asfáltica caliente con asfalto modificado con GCR // T4-T5 Sección IDU 560-11 | 15,0            | 0,15             | \$ 924.986 | \$ 138.748        | \$ 91.573.614         |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11                                | 25,0            | 0,25             | \$ 128.548 | \$ 32.137         | \$ 21.210.420         |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11                    | 35,0            | 0,35             | \$ 122.360 | \$ 42.826         | \$ 28.265.160         |
| Estabilización de subrasante con rajon                                               | 40,0            | 0,4              | \$ 99.371  | \$ 39.748         | \$ 26.233.944         |
| <b>TOTAL</b>                                                                         | <b>115,0</b>    |                  |            | <b>\$ 253.459</b> | <b>\$ 167.283.138</b> |
| MD12                                                                                 |                 |                  |            |                   |                       |
| CAPA                                                                                 | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA                   |
| Mezcla asfáltica densa en caliente MD12 con cemento asfáltico 60-70 // T4-T5         | 15,0            | 0,15             | \$ 543.269 | \$ 81.490         | \$ 53.783.631         |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11                                | 25,0            | 0,25             | \$ 128.548 | \$ 32.137         | \$ 21.210.420         |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11                    | 35,0            | 0,35             | \$ 122.360 | \$ 42.826         | \$ 28.265.160         |
| Estabilización de subrasante con rajon                                               | 40,0            | 0,4              | \$ 99.371  | \$ 39.748         | \$ 26.233.944         |
| <b>TOTAL</b>                                                                         | <b>115,0</b>    |                  |            | <b>\$ 196.202</b> | <b>\$ 129.493.155</b> |
| MD20                                                                                 |                 |                  |            |                   |                       |
| CAPA                                                                                 | ESPEJOR<br>(cm) | CANTIDADES<br>M3 | VALOR M3   | VALOR<br>UNITARIO | VÍA                   |
| Mezcla asfáltica densa en caliente MD20 con cemento asfáltico 60 - 70 // T4-T5       | 15,0            | 0,15             | \$ 585.494 | \$ 87.824         | \$ 57.963.906         |
| Base granular Clase A T4-T5 BG-Gr2 Sección IDU 400-11                                | 25,0            | 0,25             | \$ 128.548 | \$ 32.137         | \$ 21.210.420         |
| Subbase granular Clase A T4-T5 SB-Gr1 ó SB-Gr2 Sección IDU 400-11                    | 35,0            | 0,35             | \$ 122.360 | \$ 42.826         | \$ 28.265.160         |
| Estabilización de subrasante con rajon                                               | 40,0            | 0,4              | \$ 99.371  | \$ 39.748         | \$ 26.233.944         |
| <b>TOTAL</b>                                                                         | <b>115,0</b>    |                  |            | <b>\$ 202.536</b> | <b>\$ 107.439.486</b> |

Tabla 144. Relación costo beneficio por año de vida útil (Nt: 3.500.000 CBR 2%)

| ANÁLISIS COMPARATIVO DE COSTOS - CAPA ASFÁLTICA POR AÑO DE VIDA ÚTIL |                      |                                                         |                      |                              |                  |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------|
| MEZCLA ASFÁLTICA                                                     | VALOR CAPA ASFÁLTICA | NÚMERO DE REPETICIONES ADMISIBLES - ANÁLISIS POR FATIGA | VIDA ÚTIL POR FATIGA | VIDA ÚTIL POR FATIGA EN AÑOS | COSTO/AÑO        |
| GCR                                                                  | \$ 91.573.614        | 4.353.471                                               | 145,12%              | 14,51                        | \$ 6.310.387,06  |
| MD12                                                                 | \$ 53.783.631        | 325.973                                                 | 10,87%               | 1,58                         | \$ 34.109.465,68 |
| MD 20                                                                | \$ 57.963.906        | 252.719                                                 | 8,42%                | 1,22                         | \$ 47.416.175,43 |

De acuerdo con los resultados obtenidos se muestra que la mezcla GCR tiene una vida útil por fatiga 9 a 12 veces mayor en comparación de las mezclas convencionales (MD12 y MD20). Por lo tanto, aun cuando su costo es un 30% a 60% superior, esta inversión se justifica porque con la mezcla GCR se estaría aumentando de 5 a 8 veces la durabilidad a la fatiga por cada peso invertido, con relación a las mezclas MD12 y MD20.

El análisis realizado muestra que la mezcla asfáltica GCR, a pesar de ser más costosa, garantiza que las estructuras de pavimento soporten un mayor número de repeticiones de carga y con su utilización se obtiene una mayor relación beneficio / costo, ya que se obtiene un menor valor al calcular la relación entre el costo de la mezcla y la vida útil esperada por fatiga.

### Conclusiones

- Existe una gran variabilidad entre los tipos de ensayos presentados por los contratistas de las mezclas producidas en planta y así mismo los resultados obtenidos presentan una gran dispersión en la mayor parte de los casos. También es necesario señalar que no se encontraron suficientes ensayos para considerar la muestra evaluada como representativa.

- La mezcla con asfalto modificado con GCR mostró en la mayoría de los casos un mejor comportamiento de la fatiga que las mezclas MD12 y MD20. Esto se debe a que a pesar de que el asfalto modificado con GCR es más rígido (viscoso), el tipo de mezcla que se hace (mezcla de gradación discontinua) incorpora una mayor cantidad de asfalto.
- Todas las mezclas analizadas presentan baja susceptibilidad al daño generado por el agua, evaluado por el ensayo de resistencia retenida en tracción indirecta. Comparando los promedios de los resultados obtenidos, la mezcla asfáltica GCR presenta la menor susceptibilidad al agua (89,4%) mientras que las dos mezclas densas de gradación continua tienen resultados similares (87,3% para la MD12 y 86,2% para la MD20) pero menor dispersión en los valores de RRT.
- La mezcla asfáltica MD20 presentó un mejor desempeño en los ensayos de deformación plástica (resistencia al ahuellamiento) que las mezclas MD12 y GCR, esto puede explicarse porque la mezcla MD20 tiene agregados de mayor tamaño que la MD12 y un menor contenido de asfalto que la GCR, además de que la mezcla GCR es de granulometría discontinua. Los resultados de estos ensayos en la mezcla MD12 son muy dispersos y no permitieron establecer una tendencia central.
- En cuanto a los resultados de los ensayos de módulo, tanto para el módulo resiliente como para el módulo dinámico existe gran dispersión en los resultados obtenidos. En promedio, las mezclas MD20 presentan mayores módulos para todas las frecuencias y temperaturas evaluadas, mientras que las mezclas GCR son las de menor módulo.

- Al interpolar los módulos dinámicos (parámetro de diseño) para una temperatura de 20°C y una frecuencia de 5Hz (que corresponde a una velocidad aproximada de 30 km/h) se obtuvieron valores promedios de módulos de 5144 MPa para la mezcla MD20, 4678 MPa para la mezcla MD12 y 4073 MPa para la mezcla GCR. Aunque estos valores no se pueden tomar como representativos debido a la gran dispersión de los resultados, es posible concluir que la mezcla MD20 es la más rígida y la mezcla GCR la más flexible.
- Los valores de módulo dinámico obtenidos para la condición de diseño recomendada por el IDU (20°C y 5Hz) corresponden a mezclas de media a muy alta rigidez (2664 a 6761 MPa), y en términos generales superan los valores típicos disponibles en la literatura técnica. Esto puede deberse a que se está utilizando para las mezclas densas (MD12 y MD20) un asfalto 60-70 (recomendado por el IDU para capas de rodadura e intermedia en las categorías de tránsito T4 - T5).
- Las mezclas asfálticas MD12 diseñadas para nivel de tránsito alto (T4 – T5) presentan una alta rigidez, una moderada resistencia al ahuellamiento y una baja resistencia a la fatiga, por lo tanto y tal como lo especifica el IDU se recomienda su uso únicamente para capas de rodadura. Para niveles de tránsito bajo (T0 – T1) aun cuando el diseño Marshall tiene otro tipo de requerimientos y según el IDU debe usarse asfalto 80-100, es conveniente evaluar su comportamiento ya que se podrían estar produciendo mezclas muy rígidas para capas de rodadura delgadas, lo que produciría problemas de fisuración temprana.

- Las mezclas asfálticas MD20 evaluadas (nivel de tránsito T4 – T5) presentan la mayor rigidez, la menor deformación plástica y la menor resistencia a la fatiga. En consecuencia, se recomienda su uso para capas de rodadura donde la mezcla está sometida a esfuerzos exclusivamente de compresión. Aunque las especificaciones técnicas IDU-ET-2011 permiten usar esta mezcla también como capa intermedia asfáltica o base asfáltica, debe tenerse cuidado que solo se haga como intermedia cuando se requiera construir el espesor total de mezclas asfálticas en tres capas y nunca como base asfáltica. Es decir que, cuando la carpeta asfáltica debe construirse en dos capas no debería utilizarse la mezcla MD12 como capa inferior (intermedia).
- La mezcla asfáltica GCR tiene menores módulos, mayores deformaciones plásticas y mayor resistencia a la fatiga que las mezclas densas MD12 y MD20, por lo tanto, su uso debería ser siempre como capa inferior (base asfáltica cuando se construyen tres capas o más, intermedia cuando se requieran dos capas o rodadura asfáltica cuando se requiera una sola capa).
- Como rodadura asfáltica en vías de elevados volúmenes de vehículos pesados las mezclas MD20 y GCR presentaron menores deformaciones plásticas que las mezclas MD12. Las mezclas densas MD20 tienen un menor costo mientras que las mezclas GCR a pesar de ser más costosas presentan una menor susceptibilidad al daño por humedad.
- Considerando la alta variabilidad en los resultados de los pocos ensayos encontrados, no fue posible obtener valores representativos de parámetros para diseño estructural de pavimentos. Sólo se tenían ensayos de mezclas de rodadura MD12 y MD20 para



nivel de transito T4 – T5 y de la mezcla asfáltica GCR. No se tienen diseños ni ensayos realizados sobre mezclas de tipo semidensas y gruesas que son las que se deberían utilizar en las capas de intermedia y base y podrían compararse en fatiga con la mezcla asfáltica GCR.

- Dado que no se cuenta con una muestra representativa de ensayos de desempeño de las mezclas asfálticas no fue posible proponer una reducción en los espesores cuando se utiliza la mezcla GCR en lugar de mezclas convencionales.
- Para el diseño por la metodología AASHTO 93 es posible utilizar mayores coeficientes estructurales para las capas asfálticas y reducir su espesor, ya que los valores de módulo dinámico de las mezclas ensayadas son superiores a los normalmente considerados para diseño. En este sentido, las mezclas MD12 y MD20 tendrían un mayor coeficiente estructural que la mezcla GCR y al aplicar el método no se obtendría una reducción de espesor remplazando las mezclas densas convencionales con la mezcla discontinua GCR.
- En el diseño para la metodología racional (Shell), fue posible con las curvas de fatiga promedio determinar el beneficio que se obtiene al implementar mezclas GCR ya que al hacer el análisis de la vida útil de fatiga esperada para las estructuras dimensionadas con AASHTO 93 se obtuvieron valores de repeticiones superiores al tránsito de diseño. Esto significa que es posible que las mezclas asfálticas GCR pueden soportar un número de ejes mayor al estimado para el periodo de diseño. Sin embargo, aunque se hizo una comparación con las mezclas MD12 y MD20 los resultados obtenidos solo pueden ser interpretados cualitativamente porque estas mezclas altamente rígidas

no deben usarse en la capa inferior (intermedia o base) de la carpeta asfáltica que está normalmente sometida a esfuerzos de tracción.

- En vías construidas sobre subrasantes blandas es muy importante garantizar un correcto apoyo de la estructura de pavimento mediante la construcción de una plataforma o mejoramiento que disminuya los esfuerzos debidos a las cargas vehiculares en la subrasante y las deformaciones en las capas del pavimento. Según esto, para la ciudad de Bogotá, en donde predominan las subrasantes blandas, las estructuras de pavimentos flexibles además de contar con mejoramientos y espesores de capas granulares suficientes deben ser construidas utilizando mezclas asfálticas de alta resistencia a la fatiga, como la mezcla GCR que soporta un mayor número de repeticiones.

### **Recomendaciones**

- Los ensayos realizados sobre las mezclas asfálticas producidas en planta deben tener un mayor grado de estandarización, porque se evidenció que los productores de mezclas desarrollan los laboratorios con diferentes normas, temperaturas y frecuencias.
- Considerando la variabilidad de los resultados obtenidos por las diferentes plantas es necesario que se implementen mayores controles a la producción de las mezclas asfálticas en Bogotá y que se ajusten los parámetros de diseño con los resultados obtenidos.
- Es necesario que las mezclas se usen de acuerdo con sus características y su desempeño, esto debido a que en la actualidad se les está dando un uso inadecuado a

las mezclas asfálticas. Según la normativa IDU 510-11 para un tránsito de alto flujo las mezclas que deberían ir en la capa de rodadura son la MD12 y MD20, debido a su rigidez y su capacidad de soportar cargas a compresión y como base se sugiere utilizar la mezcla asfáltica GCR gracias a la gran capacidad que tiene para soportar fatiga (esfuerzos de tensión).

- Para la malla vial local como lo son vías de barrios y bahías, se recomienda la mezcla GCR que tiene en sus propiedades baja rigidez, menor susceptibilidad al daño por humedad y mayor resistencia a la fatiga, lo cual evita que se fisure a temprana edad y garantiza una mayor vida útil de las estructuras construidas.

### **Referencias bibliográficas**

Aguilera, E. C., & Ramírez, C. R. (2016). *DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA EN MEZCLAS ASFÁLTICAS ELABORADAS CON ASFALTOS CONVENCIONALES Y MATERIALES DE PEÑA Y RÍO*. Obtenido de repository.ucatolica:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15108/1/DETERMINACIÓN%20DE%20LA%20ADHERENCIA%20EN%20MEZCLAS%20ASFÁLTICAS%20ELABORADAS%20CON%20ASFALTOS%20CONVENCIONALES%20Y%20MAT.pdf>

Alfaro, M. Flores, J. & Martínez, C. (noviembre de 2016). Estudio comparativo de las leyes de fatiga en mezclas asfálticas convencionales haciendo uso de la viga de fatiga. El Salvador, Centro América: Universidad de El Salvador.

Arenas L. (1999). Teoría de los pavimentos. Universidad del Cauca, Colombia.

ARL SURA. (s.f.). *Resolución Número 1457 de 2010*. Obtenido de [https://www.arlsura.com/images/stories/documentos/res1457\\_2010.pdf](https://www.arlsura.com/images/stories/documentos/res1457_2010.pdf)

Berrios A. (2017). *Diseño y evaluación del desempeño de una mezcla asfáltica tipo MSC-19 con incorporación de Tereftalato de Polietileno reciclado como agregado constitutivo*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.

Cabrera, G. H., & Rodríguez, F. R. (2016). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DE UNA MEZCLA ASFALTICA EN SU DEFORMACIÓN PERMANENTE Y LA SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD*. Obtenido de Repositorio U. Católica:

Claros, C. M., & Celis, L. C. (2017). *Implementación del grano de caucho reciclado (GCR) proveniente de llantas usadas para mejorar las mezclas asfálticas y garantizar pavimentos sostenibles en Bogotá*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.

D.C, A. M., IDU, & Andes, U. d. (23 de septiembre de 2002). *IDU*. Obtenido de Estudio de las mejoras mecánicas de mezclas asfálticas con desechos de llantas : [https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras\\_mecanicas\\_mezclas\\_asfalticas\\_desechos\\_llantas.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7460/mejoras_mecanicas_mezclas_asfalticas_desechos_llantas.pdf)

IDU. (2009). *Mejoras mecánicas de las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado - GCR*. Obtenido de [https://www.idu.gov.co/web/content/7419/boletin\\_grano\\_caucho\\_reciclado\\_2015.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/7419/boletin_grano_caucho_reciclado_2015.pdf)

IDU. (2012). *Llantas y asfaltos reciclados para pavimentar a Bogotá: Apuesta ambiental del IDU a partir*. Obtenido de [https://www.idu.gov.co/web/content/3711/info\\_pavimentos\\_amigables\\_05jun12.pdf](https://www.idu.gov.co/web/content/3711/info_pavimentos_amigables_05jun12.pdf)

IDU. (s.f.). *MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE DENSAS, SEMIDENSAS, GRUESAS, Y DE ALTO MÓDULO SECCION 510-11*. Recuperado el 05 de 2019, de idu.gov.co: <https://www.idu.gov.co/web/content/7623/510-11.pdf>

IGAC. (2011). *Resolución 6981 de 2011 Secretaría Distrital de Movilidad - Secretaría Distrital de Ambiente*. Obtenido de [http://www2.igac.gov.co/igac\\_web/normograma\\_files/RESOLUCION%206981%20DE%202011.pdf](http://www2.igac.gov.co/igac_web/normograma_files/RESOLUCION%206981%20DE%202011.pdf)

INVIAS. (13 de enero de 2014). *Objetivos y Funciones*. Recuperado el 05 de 2019, de [invias.gov:https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/objetivos-y-funciones](https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/objetivos-y-funciones)

INVIAS. (2012). *SUMINISTRO DE CEMENTO ASFÁLTICO MODIFICADO CON GRANO DE CAUCHO RECICLADO*. Recuperado el 05 de 2019, de [ani.gov:ftp://ftp.ani.gov.co/Licitación%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Especificaciones%20Generales%20de%20Construcción%20de%20carreteras/CAPÍTULO%204\\_1.pdf](ftp://ftp.ani.gov.co/Licitación%20VJVGCLP%20001-2016-M-1/Especificaciones%20Generales%20de%20Construcción%20de%20carreteras/CAPÍTULO%204_1.pdf)

INVIAS. (s.f.). ANI. Obtenido de *Capitulo 4 - Pavimentos Asfálticos*: <ftp://ftp.ani.gov.co/Licitación%20VJVGCLP%20001-2016-M->

1/Especificaciones%20Generales%20de%20Construccion%20de%20carrete  
ras/CAP%C3%8DTULO%204\_1.pdf

Leiva, F. (septiembre de 2004). *MODULO DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS*. Obtenido de LENAMME:  
[https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/425/MODULO\\_DINAMICO\\_MEZCLAS\\_ASFALTICAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/425/MODULO_DINAMICO_MEZCLAS_ASFALTICAS.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Lesmes, C. A. (noviembre de 2018). Implementación de mezcla asfáltica modificada con granulo de caucho en el barrio San Carlos de la localidad de Tunjuelito. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

López, J. A. (07 de diciembre de 2018). Evaluación comparativa de mezclas convencionales y mezclas modificadas con granulo de caucho (GCR), por medio de briquetas desarrolladas en los laboratorios de la Unidad Administrativa Especial de Rehabilitación y Mantenimiento Vial (UAERMV). Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20620/ForeroLopezJesusForero2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

López, R. D (junio de 2008). Variabilidad del módulo resiliente de una mezcla asfáltica MDC-2 dentro de la ventana de diseño propuesta por M. Witczak. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Obtenido de <http://bdigital.unal.edu.co/1233/1/davidlopezramirez.2008.pdf>

Maldonado, N. A. (2016). Impacto social de las 4G de concesiones viales en la actividad empresarial colombiana. Bogotá D.C, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.

Min ambiente. (2016). Obtenido de <http://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2417-nuestra-meta-sera-llegar-a-reciclar-el-90-de-las-llantas-usadas-en-el-pais-minambiente>

Minambiente. (2020). Llantas usadas. Obtenido de El ambiente es de todos: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/248-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-14>

Ramírez, D. (junio de 2008). Variabilidad del módulo resiliente de una mezcla asfáltica MDC-2 dentro de la ventana de diseño propuesta por M Witczak. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Rodríguez, A. P. (2004). Mezclas Asfálticas. En A. P. Rodríguez, Análisis de la resistencia a las deformaciones plásticas de mezclas bituminosas densas de la normativa mexicana mediante el ensayo de pista. Barcelona, España.: Universidad Politécnica de Cataluña.

Xiao, Y. (2009). Evaluation of engineering properties of hot mix asphalt concrete for the mechanistic-empirical pavement design. Tallahassee: Florida State University.

YEPES, V. (2014). *Maquinaria para la fabricación y puesta en obra de mezclas bituminosas*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

Velázquez, M. (1977). Manual del Asfalto. Urmo, S.A. De Ediciones

Vera, J. (abril de 2012). Caracterización de Mezclas Asfálticas por su Resistencia a  
Fatiga por Reflexión. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.