



# **UNIVERSIDAD DE CUENCA**

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas con vidrio triturado.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autoras:

Susana Cristina Crespo Argudo

cris.crespo5009@gmail.com

CI: 0302397310

Yessenia Marcela Pinos Veletanga

yessep203@gmail.com

CI: 0104702881

Director:

Ing. Jaime Asdrúbal Bojorque Iñiguez, PhD.

CI: 0102857885

**Cuenca, Ecuador**

22-febrero-2021



### **Resumen:**

La red vial nacional en su gran mayoría está compuesta por pavimento flexible, mismo que exhibe la aparición temprana de patologías que empeoran al no darle mantenimiento; dichos problemas se relacionan con la calidad de los agregados, el asfalto, entre otros; debido a esto, el presente trabajo de investigación se enfoca en analizar el desempeño de la incorporación de vidrio triturado en las mezclas asfálticas en porcentajes de 5 al 20%. A través del método Marshall se diseñaron y evaluaron las mezclas asfálticas convencionales y modificadas, determinando así el porcentaje óptimo de asfalto y demás parámetros necesarios que debe cumplir una mezcla asfáltica. Con la mezcla asfáltica convencional se obtuvo un porcentaje óptimo de betún de 6.5%, una estabilidad de 6327.23 lb, en cambio, con la adición del 15% de vidrio, se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto 5.93%, una estabilidad de 6413.27 lb; en general la adición del vidrio mejora las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica y disminuye el porcentaje óptimo de asfalto usado. Además, del análisis económico que se realizó a las dos diferentes mezclas asfálticas, se obtuvo que 1 Km de vía con mezcla modificada con vidrio cuesta 489.95 USD más que una vía con mezcla asfáltica convencional, sin embargo, la importancia de incorporar vidrio a la mezcla asfáltica no solo radica en mejorar las propiedades de la mezcla, sino que desde un punto de vista técnico ayuda a la solución ambiental para el manejo de los desperdicios en preservación del medio ambiente.

**Palabras claves:** Mezcla asfáltica en caliente. Mezclas asfáltica modificada. Mezcla asfáltica convencional. Mezcla asfáltica patrón. Vidrio. Vidrio triturado. Vidrio molido. Glassphalt. Método Marshall.



**Abstract:**

The vast majority of the national road network is made up of flexible pavement, which exhibits the early appearance of pathologies that worsen by not maintaining it; these problems are related to the quality of the aggregates, asphalt, among others. Due to this, the present research work focuses on analyzing the performance of the incorporation of crushed glass in asphalt mixtures in percentages of 5 to 20%. Through the Marshall method, the conventional and modified asphalt mixtures were designed and evaluated, thus determining the optimal percentage of asphalt and other necessary parameters that an asphalt mixture must meet. With the conventional asphalt mixture, was obtained an optimum percentage of bitumen of 6.5% and a stability of 6327.23 lb., but on the other hand, with the addition of 15% of glass, an optimum percentage of asphalt 5.93% was obtained and a stability of 6413.27 lb. In general, the addition of glass improves the mechanical properties of the asphalt mix and reduces the optimum percentage of asphalt used. In addition, the economic analysis that was carried out on the two different asphalt mixtures, it was obtained that 1 km of track with modified glass mix costs 489.95 USD more than a way with conventional asphalt mix. However, the importance of incorporating glass into the mix asphalt not only lies in improving the properties of the mixture, but from a technical point of view, it helps the environmental solution for the management of waste in preservation of the environment.

**Keywords:** Hot asphalt mixture. Modified asphalt mixtures. Conventional asphalt mix. Standard asphalt mix. Glass. Crushed glass. Ground Glass. Glassphalt. Marshall Method.



## Índice

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>ANTECEDENTES</b> .....	<b>20</b>
<b>PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>21</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>22</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
<b>ALCANCE</b> .....	<b>23</b>
<b>LIMITACIONES</b> .....	<b>23</b>
<b>CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>24</b>
1.1. Pavimentos .....	24
1.1.1. Clasificación de los pavimentos .....	25
1.2. Pavimentos flexibles .....	26
1.2.1. Estructura del pavimento flexible .....	26
1.3. Mezclas asfálticas.....	27
1.3.1. Tipos de mezclas asfálticas .....	28
1.3.2. Propiedades de una mezcla asfáltica en caliente.....	28
1.3.3. Parámetros volumétricos y gravimétricos en mezclas asfálticas .....	31
1.4. Áridos .....	36
1.5. Vidrio .....	37
1.5.1. Propiedades del vidrio .....	37
1.5.2. Vidrio como agregado en mezclas asfálticas .....	38
1.6. Cal hidratada.....	40
1.6.1. Propiedades de la cal hidratada sobre el pavimento.....	40
1.7. Diseño de mezclas asfálticas .....	40
1.7.1. Método Marshall .....	41
<b>CAPITULO 2: METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE MEZCLAS</b> .....	<b>43</b>
2.1. Caracterización de agregados para mezclas asfálticas .....	43
2.1.1. Áridos.....	43
2.1.2. Cemento Asfáltico .....	45
2.1.3. Vidrio .....	46
2.2. Método de diseño de mezclas asfálticas en caliente.....	46
2.2.1. Mezcla asfáltica convencional.....	47
2.2.2. Mezcla asfáltica modificada con vidrio triturado .....	47
2.3. Caracterización del diseño de mezclas asfálticas .....	48
2.3.1. Ensayo Marshall .....	48
2.3.2. Ensayo Rice.....	48
2.3.3. Ensayo de Abrasión .....	48
2.4. Trabajo en laboratorio.....	48
2.4.1. Origen de los agregados utilizados.....	48
2.4.2. Origen del cemento asfáltico .....	51
2.4.3. Ensayos en Áridos.....	51
2.4.4. Ensayos en el Vidrio.....	58
2.4.5. Ensayos en Mezclas Asfálticas .....	62
<b>CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS</b> .....	<b>74</b>
3.1. Resultados de la caracterización de los materiales .....	74
3.1.1. Caracterización de los áridos .....	74
3.1.2. Caracterización del cemento asfáltico .....	79
3.1.3. Caracterización del vidrio .....	80



3.1.4.	Caracterización de la cal hidratada.....	82
3.2.	Análisis de la mezcla asfáltica convencional .....	83
3.2.1.	Dosificación de la mezcla convencional .....	83
3.2.2.	Gravedad específica máxima teórica (Gmm) .....	85
3.2.3.	Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados 85	
3.2.4.	Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.....	89
3.3.	Mezcla asfáltica con vidrio.....	90
3.3.1.	Análisis de la mezcla asfáltica con el 5% vidrio.....	90
3.3.2.	Análisis de la mezcla asfáltica con 10% de vidrio .....	97
3.3.3.	Análisis de la mezcla asfáltica con 15% de vidrio .....	103
3.3.4.	Análisis de la mezcla asfáltica con 20% de vidrio .....	109
3.4.	Análisis de los resultados entre la mezcla asfáltica patrón y las mezclas asfálticas modificadas con vidrio. ....	115
3.5.	Resultados del ensayo de abrasión .....	119
3.6.	Resultados del ensayo de adherencia .....	122
3.7.	Determinación del porcentaje óptimo de vidrio triturado .....	125
3.8.	Análisis de precios unitarios .....	125
	<b>CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>131</b>
4.1.	Conclusiones .....	131
4.2.	Recomendaciones .....	135
4.2.1.	Recomendaciones con respecto a la investigación .....	135
4.2.2.	Recomendaciones con respecto a trabajos futuros .....	136
	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>137</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>141</b>



## Índice de tablas

Tabla 1. Requisitos de graduación para mezclas asfálticas densas (Marshall).....	44
Tabla 2. Requisitos del agregado grueso para mezclas asfálticas.....	44
Tabla 3. Normas para determinar la gravedad específica de los agregados. ....	45
Tabla 4. Rangos mínimos y máximos que debe cumplir el cemento asfáltico. ....	46
Tabla 5. Especificaciones de la norma AASHTO M318.. ..	46
Tabla 6. Abertura de Tamices del Agregado Grueso. ....	52
Tabla 7. Abertura de Tamices del Agregado Fino. ....	53
Tabla 8. Número de golpes correspondientes a los diferentes volúmenes de tráfico. ....	64
Tabla 9. Muestra mínima para el ensayo RICE.....	69
Tabla 10. Análisis granulométrico del árido A. ....	75
Tabla 11. Análisis Granulométrico del árido B.....	76
Tabla 12. Análisis granulométrico del árido C. ....	77
Tabla 13. Análisis granulométrico del árido D. ....	78
Tabla 14. Resultados del ensayo de abrasión.....	79
Tabla 15. Resultados del ensayo de peso específico y absorción. ....	79
Tabla 16. Resultados del análisis del betún asfáltico. ....	80
Tabla 17. Análisis granulométrico del árido E. ....	81
Tabla 18. Resultados de peso específico y absorción del vidrio. ....	82
Tabla 19. Análisis granulométrico de la cal hidratada. ....	82
Tabla 20. Dosificación de la muestra patrón. ....	84
Tabla 21. Porcentaje de combinación (Mezcla patrón). ....	84
Tabla 22. Cálculo de la gravedad específica máxima teórica. ....	85
Tabla 23. Resultados del ensayo Marshall (Muestra patrón). ....	87
Tabla 24. Resumen de los resultados con la muestra patrón.....	89
Tabla 25. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra patrón.....	89
Tabla 26. Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – Muestra patrón.....	90
Tabla 27. Dosificación de la mezcla con 5% de vidrio.....	90
Tabla 28. Porcentaje de combinación (5% vidrio). ....	91
Tabla 29. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (5% vidrio). ....	92
Tabla 30. Resultados del ensayo Marshall (5% vidrio).....	94
Tabla 31. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 5% vidrio. ....	96
Tabla 32. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 5% de vidrio.....	96
Tabla 33. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 5% vidrio. ....	96
Tabla 34. Dosificación de la mezcla con 10% vidrio.....	97
Tabla 35. Porcentaje de combinación (10% vidrio). ....	97
Tabla 36. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (10% vidrio). ....	98
Tabla 37. Resultados del ensayo Marshall (10% vidrio).....	100
Tabla 38. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 10% vidrio. ....	102
Tabla 39. Porcentaje Óptimo de Asfalto - Muestra con 10% de vidrio. ....	102
Tabla 40. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 10% vidrio. ...	102
Tabla 41. Dosificación de la mezcla con 15% vidrio.....	103
Tabla 42. Porcentaje de combinación (15% vidrio). ....	103
Tabla 43. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (15% vidrio). ....	104
Tabla 44. Resultados del ensayo Marshall (15% vidrio).....	106
Tabla 45. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 15% vidrio. ....	108
Tabla 46. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 15% de vidrio.....	108
Tabla 47. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 15% vidrio. ...	108
Tabla 48. Dosificación de la mezcla con 20% vidrio.....	109
Tabla 49. Porcentaje de combinación (20% vidrio). ....	109
Tabla 50. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (20% vidrio). ....	110
Tabla 51. Resultados del ensayo Marshall (20% vidrio).....	112



Tabla 52. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 20% vidrio. ....	114
Tabla 53. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 20% de vidrio.....	114
Tabla 54. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 20% vidrio. ...	114
Tabla 55. Resumen de los resultados óptimos.....	115
Tabla 56. Resumen del Ensayo de Abrasión. ....	119
Tabla 57. Resultados del ensayo de adherencia.....	122
Tabla 58. APU - Asfalto Convencional producido en la Planta de Asfalto.....	126
Tabla 59. APU - Asfalto Modificado con 15% de Vidrio Producido en la Planta de Asfalto.....	127
Tabla 60. APU - Asfalto convencional puesto en obra. ....	128
Tabla 61. APU - Asfalto modificado con 15% de vidrio puesto en obra. ....	129
Tabla 62. Comparación de los precios unitarios.....	129



## Índice de Figuras

Figura 1. Estructura del pavimento.....	24
Figura 2. Estructura del pavimento flexible. ....	25
Figura 3. Estructura del pavimento rígido.....	25
Figura 4. Estructura del pavimento articulado. ....	26
Figura 5. Componentes de una mezcla asfáltica compactada. ....	31
Figura 6. Parámetros de diseño volumétrico.....	32
Figura 7. Ubicación Geográfica de la mina de Ayancay de la Planta de Asfalto. ....	49
Figura 8. Ubicación Geográfica de la mina "La Virginia" Planta trituradora. ....	50
Figura 9. Entrada a la mina Guachapala - "La Virginia" ..	50
Figura 10. Extracción del material de las diferentes minas. ....	51
Figura 11. Cuarteo del material.....	52
Figura 12. Análisis Granulométrico, Tamices gruesos. ....	52
Figura 13. Análisis Granulométrico, Tamices finos. ....	53
Figura 14. Material a usar para el ensayo de abrasión. ....	54
Figura 15. Tamizado del agregado grueso.....	54
Figura 16. Material a ensayar.....	55
Figura 17. Esferas colocadas dentro de la máquina de Los Ángeles.....	55
Figura 18. Material grueso sumergido en agua.....	56
Figura 19. Material fino sumergido en agua.....	56
Figura 20. Condición SSS del árido fino.....	57
Figura 21. Condición SSS del agregado grueso.....	57
Figura 22. Peso del picnómetro más agua y muestra.....	58
Figura 23. Recolección de botellas.....	58
Figura 24. Lavado y secado de botellas.....	59
Figura 25. Trituración manual de las botellas.....	59
Figura 26. Colocación del material dentro de la Máquina de los Ángeles.....	60
Figura 27. Vidrio triturado tamizado.....	
Figura 28. Vidrio triturado.....	60
Figura 29. Cuarteo del material: vidrio.....	61
Figura 30. Tamaño máximo nominal 4.75 mm. ....	61
Figura 31. Muestras de vidrio saturadas de agua.....	62
Figura 32. Áridos calientes a temperatura de 179°C.....	62
Figura 33. Betún asfáltico calentado en la cocina.....	63
Figura 34. Mezcla asfáltica preparada.....	63
Figura 35. Introducción de la mezcla asfáltica en el molde.....	64
Figura 36. Compactación de las briquetas.....	64
Figura 37. Briquetas elaboradas.....	65
Figura 38. Peso seco en aire de la briqueta.....	66
Figura 39. Briqueta sumergida en agua a 25°C.....	66
Figura 40. Briqueta pesada en aire luego de haber sido sumergida.....	67
Figura 41. Briquetas colocadas a baño María.....	67
Figura 42. Ejecución del ensayo Marshall.....	68
Figura 43. Briquetas luego del ensayo.....	68
Figura 44. Muestra colocada en el recipiente de vacíos.....	69
Figura 45. Máquina de agitador. Figura 46. Equipo RICE.....	70
Figura 47. Temperatura del agua luego del ensayo.....	71
Figura 48. Determinar la masa del recipiente con el contenido.....	71
Figura 49. Mezcla de agregado cubierto con asfalto en agua hirviendo.....	72
Figura 50. Muestra extendida en una toalla absorbente.....	72
Figura 51. Peso de la briqueta (P1) antes del ensayo.....	73
Figura 52. Peso de la briqueta (P2) luego del ensayo.....	73



Figura 53. Curva granulométrica del árido A, 3/8"	75
Figura 54. Curva granulométrica del árido B, 5/8"	76
Figura 55. Curva granulométrica del árido C, 3/16"	77
Figura 56. Curva granulométrica del árido D, Arena.	78
Figura 57. Curva granulométrica del árido E, Vidrio.	81
Figura 58. Curva granulométrica del árido F, Cal hidratada.	83
Figura 59. Combinación de la curva granulométrica de la muestra patrón.	85
Figura 60. Briquetas patrón antes de ser ensayadas.	86
Figura 61. Contenido de vacíos (Muestra patrón).	
Figura 62. Peso específico (Muestra patrón).	
Figura 63. Estabilidad (Muestra patrón).	88
Figura 64. VFA (Muestra patrón).	
Figura 65. VMA (Muestra patrón).	
Figura 66. Flujo (Muestra patrón).	88
Figura 67. Combinación de la curva granulométrica con 5% vidrio.	91
Figura 68. Contenido de vacíos (5% vidrio).	
Figura 69. Peso específico (5% vidrio).	
Figura 70. Estabilidad (5% vidrio).	95
Figura 71. VFA (5% vidrio).	
Figura 72. VMA (5% vidrio).	
Figura 73. Flujo (5% vidrio).	95
Figura 74. Combinación curva granulométrica (10% vidrio).	98
Figura 75. Contenido de vacíos (10% vidrio).	
Figura 76. Peso específico (10% vidrio).	
Figura 77. Estabilidad (10% vidrio).	101
Figura 78. VFA (10% vidrio).	
Figura 79. VMA (10% vidrio).	
Figura 80. Flujo (10% vidrio).	101
Figura 81. Combinación curva granulométrica (15% vidrio).	104
Figura 82. Contenido de vacíos (15% vidrio).	
Figura 83. Peso específico (15% vidrio).	
Figura 84. Estabilidad (15% vidrio).	107
Figura 85. VFA (15% vidrio).	
Figura 86. VMA (15% vidrio).	
Figura 87. Flujo (15% vidrio).	107
Figura 88. Combinación curva granulométrica (20% vidrio).	110
Figura 89. Contenido de vacíos (20% vidrio).	
Figura 90. Peso específico (20% vidrio).	
Figura 91. Estabilidad (20% vidrio).	
Figura 92. VFA (20% vidrio).	
Figura 93. VMA (20% vidrio).	
Figura 94. Flujo (20% vidrio).	113
Figura 95. %Óptimo de asfalto vs % vidrio.	115
Figura 96. Va vs % de Vidrio.	116
Figura 97. VMA vs % de Vidrio.	116
Figura 98. VFA vs % de Vidrio.	117
Figura 99. Peso específico (Gmb) vs % de vidrio.	117
Figura 100. Estabilidad vs % de vidrio.	118
Figura 101. Flujo vs % vidrio.	118
Figura 102. Resultados del Ensayo de Abrasión, %Vidrio vs %Abrasión.	119
Figura 103. Muestra Patrón luego del ensayo de abrasión.	120
Figura 104. Muestra 5% vidrio luego del ensayo de abrasión.	120



Figura 105. Muestra 10% vidrio luego del ensayo de abrasión.	
Figura 106. Muestra 15% vidrio luego del ensayo de abrasión.....	121
Figura 107. Muestra 20% vidrio luego del ensayo de abrasión.....	121
Figura 108. Adherencia con muestra patrón. ....	122
Figura 109. Adherencia con 5% vidrio.....	123
Figura 110. Adherencia con 10% vidrio.....	123
Figura 111. Adherencia con 15% vidrio.	
Figura 112. Adherencia con 20% vidrio.....	124



## Anexos

Anexo 1. Resultados reales con el equipo Marshall para muestra patrón.....	141
Anexo 2. Resultados reales con el equipo Marshall para 5% de vidrio. ....	141
Anexo 3. Resultados reales con el equipo Marshall para 10% de vidrio. ....	142
Anexo 4. Resultados reales con el equipo Marshall para 15% de vidrio. ....	142
Anexo 5. Resultados reales con el equipo Marshall para 20% de vidrio. ....	143
Anexo 6. Granulometría Árido A – 1.....	144
Anexo 7. Granulometría Árido A – 2.....	145
Anexo 8. Granulometría Árido A – 3.	
Anexo 9. Granulometría Árido A – 4.....	146
Anexo 10. Granulometría Árido A – 5.....	148
Anexo 11. Granulometría Árido B – 1.....	149
Anexo 12. Granulometría Árido B – 2.....	150
Anexo 13. Granulometría Árido B – 3.....	151
Anexo 14. Granulometría Árido B – 4.....	152
Anexo 15. Granulometría Árido B – 5.....	153
Anexo 16. Granulometría Árido C – 1. ....	154
Anexo 17. Granulometría Árido C – 2.	
Anexo 18. Granulometría Árido C – 3.	
Anexo 19. Granulometría Árido C – 4. ....	155
Anexo 20. Granulometría Árido C – 5.	
Anexo 21. Granulometría Árido D – 1.	
Anexo 22. Granulometría Árido D – 2.	
Anexo 23. Granulometría Árido D – 3. ....	158
Anexo 24. Granulometría Árido D – 4.	
Anexo 25. Granulometría Árido D – 5.	
Anexo 26. Gravedad Específica y Absorción del Árido A.	
Anexo 27. Gravedad Específica y Absorción del Árido B.	
Anexo 28. Gravedad Específica y Absorción del Árido C.....	162
Anexo 29. Gravedad Específica y Absorción del Árido D.....	167
Anexo 30. Informe de Petroecuador.	
Anexo 31. Granulometría Árido E – 1.....	168
Anexo 32. Granulometría Árido E – 2.	
Anexo 33. Granulometría Árido E – 3.	
Anexo 34. Granulometría Árido E – 4.	
Anexo 35. Granulometría Árido E – 5.	
Anexo 36. Gravedad Específica y Absorción del Árido E.	
Anexo 37. Granulometría Árido F – 1.....	170
Anexo 38. Granulometría Árido F – 2.....	176
Anexo 39. Granulometría Árido F – 3.....	177
Anexo 40. Granulometría Árido F – 4.	
Anexo 41. Granulometría Árido F – 5.....	178
Anexo 42. Combinación Teórica con Muestra Patrón. ....	180
Anexo 43. Detalle de la Combinación Patrón. ....	180
Anexo 44. Combinación Teórica con 5% de Vidrio. ....	180
Anexo 45. Detalle de la Combinación con 5% de Vidrio. ....	181
Anexo 46. Combinación Teórica con 10% de Vidrio. ....	181
Anexo 47. Detalle de la Combinación con 10% de Vidrio. ....	181
Anexo 48. Combinación Teórica con 15% de Vidrio. ....	182
Anexo 49. Detalle de la Combinación con 15% de Vidrio. ....	182
Anexo 50. Combinación Teórica con 20% de Vidrio. ....	182



Anexo 51. Detalle de la Combinación con 20% de Vidrio. ....	183
Anexo 52. Dimensiones de las Briquetas - Muestra Patrón.	
Anexo 53. Dimensiones de las Briquetas - 5% Vidrio.	
Anexo 54. Dimensiones de las Briquetas - 10% Vidrio. ....	184
Anexo 55. Dimensiones de las Briquetas - 15% Vidrio. ....	187
Anexo 56. Dimensiones de las Briquetas - 20% Vidrio. ....	188
Anexo 57. Ensayo Marshall con Mezcla Patrón. ....	189
Anexo 58. Ensayo Marshall con 5% Vidrio. ....	190
Anexo 59. Ensayo Marshall con 10% Vidrio.	
Anexo 60. Ensayo Marshall con 15% Vidrio. ....	191
Anexo 61. Ensayo Marshall con 20% Vidrio. ....	193
Anexo 62. Ensayo Rice. ....	194
Anexo 63. Resultados del Ensayo de Cántabro. ....	195
Anexo 64. Briquetas Patrón. ....	196
Anexo 65. Briquetas con 5% de vidrio. ....	197
Anexo 66. Briquetas con 15% de vidrio. Anexo 67. Briquetas con 20% de vidrio. ....	198



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio  
Institucional

---

Yo, Susana Cristina Crespo Argudo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas con vidrio triturado", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de febrero de 2021

---

Susana Cristina Crespo Argudo

C.I.: 0302397310



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Yo, Yessenia Marcela Pinos Veletanga en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas con vidrio triturado", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 22 de febrero de 2021

Yessenia Marcela Pinos Veletanga

C.I: 0104702881



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Susana Cristina Crespo Argudo, autor/a del trabajo de titulación "Diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas con vidrio triturado", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de Febrero de 2021

---

Susana Cristina Crespo Argudo

C.I: 0302397310



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Yo, Yessenia Marcela Pinos Veletanga, autor/a del trabajo de titulación "Diseño y evaluación de mezclas asfálticas modificadas con vidrio triturado", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 22 de Febrero de 2021

Yessenia Marcela Pinos Veletanga

C.I: 0104702881



## *Agradecimientos*

*Agradecemos a todas las personas que formaron parte en la ejecución de la presente investigación, especialmente a la Universidad de Cuenca, a la Facultad de Ingeniería por brindarnos el espacio debido para nuestra formación académica.*

*A la empresa ASFALTAR EP, por la apertura brindada dentro del desarrollo de esta investigación.*

*Nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Jaime Bojorque por su contribución como tutor del presente trabajo de titulación.*

*A todos quienes son parte de nuestro diario vivir, que nos brindaron su apoyo, comprensión y tiempo para el logro de nuestros objetivos.*

*Cristina y Yessenia*



### ***Dedicatoria***

*Este trabajo de titulación es un gran paso en mi vida y quiero agradecer y dedicarles este trabajo a quienes mencionare a continuación:*

*A Dios por brindarme salud y fuerzas para seguir adelante.*

*A mis increíbles padres, hermanas y sobrinos que en todo momento me apoyaron con su amor y económicamente, de manera especial le dedico a mi madre Laura, una mujer luchadora que nunca permitió que me faltara nada y que sin ella no lo hubiese logrado, por eso no me alcanzará la vida para agradecerte por cada una de las cosas que haces y haz hecho por mí.*

*A mi mejor amiga y compañera de tesis que sin su apoyo y sus risas no lo hubiésemos logrado.*

*Finalmente, a mis mejores amigos de la Universidad que son como mis hermanos, a ti Belén, Maga y Flores les agradezco que me hayan acompañado en cada paso y siempre me brindaron una mano amiga, animándome y hasta siendo a veces esa mala influencia que se necesita, son únicos e incondicionales, este logro no solo es mío también de ustedes.*

***Cristina***



## *Dedicatoria*

*Con todo mi cariño y amor.*

*A Dios quien ha sido mi fortaleza, mi guía, que me dió la oportunidad de vivir y tener una familia maravillosa.*

*A mis abuelitos y mis padres, que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento. Gracias por creer en mí, apoyarme en todo y brindarme su amor. Sin ustedes a mi lado no lo hubiera logrado, tantas desveladas sirvieron de algo y aquí está el fruto de mis esfuerzos, por todo esto y mucho más, les agradezco de todo corazón que siempre estén a mi lado.*

*A mi querida compañera de tesis, gracias por todos estos años que hemos compartido momentos inolvidables llenos de risas y apoyo incondicional.*

*Yessenia*



## INTRODUCCIÓN

---

El presente trabajo de investigación analiza el diseño de una mezcla asfáltica alternativa que mejore las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla convencional en caliente, a través de la incorporación de vidrio triturado en distintos porcentajes, que varían entre el 5 al 20%.

El diseño de los especímenes seguirá el método Marshall, mismo que permitirá realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos de las briquetas ensayadas, tanto de las convencionales y las modificadas con la adición de vidrio. Se determinará el porcentaje óptimo de vidrio triturado que se deberá agregar a la mezcla asfáltica con la finalidad de que las propiedades físico - mecánicas mejoren.

### ANTECEDENTES

Las mezclas asfálticas que contienen vidrio triturado se les denomina "Glassphalt" y han sido un medio utilizado para deshacerse de los residuos de vidrio, esta práctica viene desde el año de 1990, donde por primera vez se utilizó para pavimentar una vía en la ciudad Esmeralda, Nueva York (Ammann Group, 2019).

En la universidad peruana de Los Andes, en el año 2018, se realizó una tesis titulada "*Asfaltos modificados con vidrio y su comparación técnico y económico con los asfaltos convencionales*", en la cual, según la metodología Marshall, se demostró que desde el aspecto técnico los asfaltos modificados con vidrio son mejores que los convencionales y comparados económicamente resultaron menos rentables debido a que el costo de las mismas incrementaba según aumenta el porcentaje de vidrio; sin embargo, con la adición de vidrio las propiedades del asfalto se vieron mejoradas obteniéndose así asfaltos más duraderos. A las mezclas asfálticas se le adicionó el 1, 2 y 3% de vidrio, los mejores resultados se dieron con mezclas con el 2% identificándose adicionalmente una disminución del porcentaje óptimo de asfalto.

En el año 2019, en la Universidad Cesar Vallejo de Perú, se realizó una tesis con el tema: "*Uso del vidrio reciclado en el diseño de mezcla asfáltica para la Av. Chulucanas entre Av. Sánchez Cerro y Av. Principal de Santa Margarita - Piura, 2018*", donde a las mezclas asfálticas se les incorporó el 5 y 10% de vidrio. Los resultados del ensayo Marshall mostraron un incremento de la estabilidad, flujo e índice de rigidez y una disminución del porcentaje de vacíos según se incrementa la adición de vidrio. En base de los resultados, se recomienda el uso de aditivos que mejoren la adherencia entre la mezcla asfáltica y el vidrio al aumentar este su porcentaje en la mezcla.

En Ecuador, en el año 2016, se realizó una investigación en la Universidad Técnica del Norte en la ciudad de Ibarra, con el tema "*Pavimentos sustentables con vidrio reciclado en asfalto para vías públicas*", donde se elaboraron ensayos de mezclas asfálticas con adición del 0, 20, 30 y 40% de vidrio. Se determinó que las propiedades de la mezcla asfáltica mejoran mientras incrementaba el



porcentaje de vidrio; sin embargo, el porcentaje óptimo de vidrio en la mezcla es del 20%; el cual es recomendado por la norma AASHTO M-318-01, pues porcentajes entre 30 y 40% afectan las propiedades de dureza de la mezcla y presentaban resquebrajamiento.

Posteriormente, en el año 2018 se desarrolló un trabajo de titulación en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador denominado: *“Uso de vidrio en las mezclas asfálticas, con el propósito de reducir la contaminación”*, en el cual se realizaron briquetas con adición de 0, 3, 6, 9, 12 y 15% de vidrio. El 0% indica que la mezcla asfáltica no posee adición de vidrio, es decir, la mezcla asfáltica es convencional, que al compararla con las otras briquetas se observaron diferencias significativas en los valores de estabilidad y flujo pues en las modificadas con incorporación de vidrio los valores incrementaban, pero el porcentaje de vacíos también lo hacía, lo que es contraproducente para la mezcla. El porcentaje óptimo de vidrio que se pudo obtener fue el 12%, mismo que brindaba propiedades satisfactorias a la mezcla además de cumplir con los requerimientos necesarios establecidos por el MTOP.

De las investigaciones citadas se puede notar que, al incrementar el porcentaje de vidrio en las mezclas asfálticas, la estabilidad y el flujo mejoran, pero si el porcentaje adicionado incrementa demasiado, la mezcla se vuelve rígida. El costo de estas nuevas mezclas también se ven en incremento por la trituración del vidrio; sin embargo, este se compensaría con la durabilidad de los asfaltos debido a la mejora en sus propiedades.

A partir de las investigaciones realizadas, se aprecia la variación en el porcentaje de vidrio empleado y resultados con los diferentes porcentajes, esto se puede deber al tipo de materiales asfálticos y áridos empleados. De aquí que es importante, analizar el efecto de la incorporación de vidrio a mezclas asfálticas en la región, empleando los áridos y asfaltos disponibles.

## **PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN**

La interacción entre las capas del pavimento (base, sub-base y carpeta asfáltica) con el terreno natural rasanteado (subrasante) produce deformaciones, esfuerzos de corte, compresión y tracción en la estructura, que en muchas ocasiones comprometen su rendimiento, funcionamiento y seguridad (Hernández & Rodríguez, 2018); lo cual provoca en la carpeta asfáltica la aparición temprana de diversas patologías como envejecimiento prematuro, agrietamiento, pérdida de agregados y su posterior ahuellamiento, conocido comúnmente como baches (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2008).

El impacto de estas patologías en la infraestructura eleva el costo de mantenimiento de la red vial, lo cual genera un gran interés en el estudio de las causas que lo provocan, ya que se demuestra que los asfaltos convencionales utilizados tienen propiedades y características que ya no satisfacen las necesidades de flujo vehicular, cambios climáticos, entre otros aspectos (Forigua & Pedraza, 2014). Generalmente, las causas se asocian con la calidad de los agregados, calidad del asfalto, los procesos de producción, construcción, y en



menor medida, con la calidad de los diseños estructurales (Cámara Colombiana de la Infraestructura, 2008).

Puesto que los agregados determinan el comportamiento de la carpeta asfáltica, es necesario mejorar la calidad de los mismos y buscar nuevas alternativas de producción, construcción e implementándolas en las técnicas de dosificación, para que permitan mejorar las propiedades del pavimento (Hernández & Rodríguez, 2018). Es aquí que, la incorporación de vidrio en las mezclas asfálticas se presenta como una alternativa ecológica para mejorar sus propiedades, además que contribuye al manejo de estos desechos.

El vidrio es un material 100% reciclable, además tiene las características de ser resistente a la oxidación y a la corrosión, convirtiéndole en un material ideal para ser reutilizado; el principal problema radica, en que los envases de vidrio, al ser no biodegradables terminan en rellenos sanitarios, aumentando así la contaminación (Gutierrez, 2015).

Al ser el vidrio un material que posee las propiedades de la arena de sílice natural de alta calidad, debido a que se encuentra libre de contaminantes y arcilla, le proporciona a la mezcla asfáltica un mayor contenido de aglutinante efectivo, a través de la baja absorción y mayor dureza (Neilson, A., 2009). Además, la baja permeabilidad que posee el vidrio es semejante al de la arena gruesa, lo que permitirá sustituir el árido por el vidrio en la mezcla (Torres, 2019).

## **HIPÓTESIS**

Por esta razón, se considera el presente trabajo de investigación que propone encontrar una alternativa para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla asfáltica en caliente con la incorporación de vidrio triturado con materiales del sector. Teóricamente, dicha adición mejorará las propiedades de la mezcla asfáltica como es la resistencia a la deformación plástica, soportar mayores presiones, brindándole al asfalto propiedades que normalmente no posee. De aquí que, es fundamental realizar una comparación entre las mezclas asfálticas convencionales y las modificadas con vidrio, con la finalidad de demostrar la capacidad del vidrio como reemplazo de parte de los agregados del sector.

La importancia de este trabajo radica, no solo en modificar una mezcla asfáltica con el uso de un material novedoso, sino que desde un punto de vista técnico ayude a la economía y a la solución ambiental del manejo de los desperdicios en preservación del medio ambiente.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar una mezcla asfáltica alternativa adicionando vidrio triturado y evaluar las características físico - mecánicas de las mismas versus una mezcla asfáltica convencional.



### **Objetivos Específicos**

1. Realizar la revisión sistemática de bibliografía relacionada al tema.
2. Determinar las propiedades mecánicas de los materiales (agregado grueso, fino y vidrio).
3. Diseñar la mezcla asfáltica convencional (patrón), determinando la dosificación más adecuada.
4. Diseñar la mezcla asfáltica modificada con vidrio triturado, determinando la dosificación más adecuada.
5. Evaluar el comportamiento físico - mecánico entre la mezcla convencional (mezcla patrón) y las mezclas alternativas, además de realizar un análisis de costo - beneficio entre los dos tipos de mezclas asfálticas.

### **ALCANCE**

El presente trabajo de titulación pretende realizar la caracterización de los agregados (áridos y vidrio) mediante ensayos en laboratorio. A partir de esto, se elaborarán en total 85 briquetas; de las cuales 60 briquetas tendrán una adición de 5, 10, 15 y 20% de vidrio y 15 briquetas sin ninguna adición de vidrio. Dichos especímenes contarán con un contenido de 5 a 7% de betún asfáltico.

Luego de que se haya establecido el porcentaje óptimo de betún a través del ensayo Marshall, las 10 briquetas restantes, serán evaluadas mediante los ensayos de adherencia y desgaste.

Los resultados que den los ensayos servirán para el análisis y contraste del comportamiento físico - mecánico de las briquetas y su posterior evaluación ante el costo - beneficio de las mismas.

### **LIMITACIONES**

- El caso de estudio del presente trabajo de titulación se limita a utilizar vidrio triturado derivado del reciclaje de botellas de refrescos, cerveza, jugos, entre los principales.
- Al no contar con una máquina de trituración para el vidrio, el proceso se realizará mediante la utilización de la máquina de los Ángeles y un molino casero con la finalidad de obtener diferentes tamaños de partículas.

## CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se describen los conceptos generales básicos de la teoría de pavimentos que se van a usar dentro del desarrollo de este trabajo de titulación, además se incluyen las características, propiedades y ventajas del vidrio en la conformación de las mezclas asfálticas.

### 1.1. Pavimentos

Los pavimentos están constituidos por un conjunto de capas relativamente horizontales superpuestas entre sí, las mismas que son diseñadas y construidas con materiales apropiados y compactadas adecuadamente sobre la subrasante de una vía donde se apoyan estas estructuras estratificadas; además, estas deben resistir los esfuerzos que le transmiten las cargas repetidas del tránsito, durante el período para el cual se ha diseñado la estructura del pavimento (Montejo Fonseca, 1998).

En la Figura 1, se presenta el conjunto de capas que componen la estructura del pavimento, cuya composición comienza con el pavimento, seguida de la base, subbase hasta llegar al terreno natural.

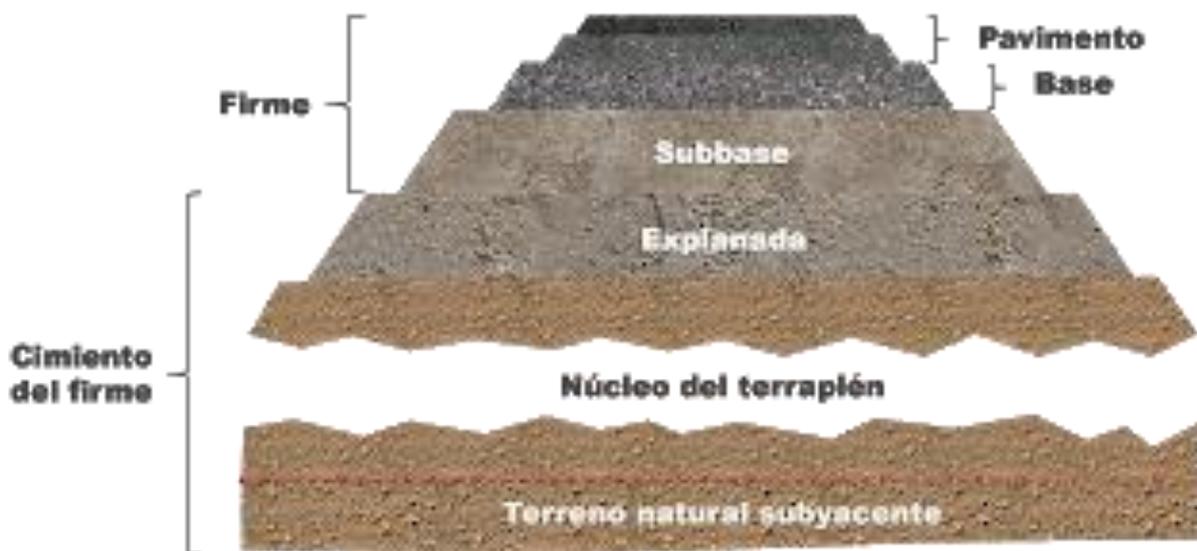


Figura 1. Estructura del pavimento.

Fuente: (Bardasano, 2020).

Las características fundamentales para que un pavimento cumpla con sus funciones son (Montejo Fonseca, 1998):

- Ser resistente a la acción de las cargas impuestas por el tránsito y los agentes de intemperismo, es decir, debe resistir el desgaste producido por el efecto abrasivo de las llantas de los vehículos.
- Ser económico, durable y ofrecer una adecuada seguridad al tránsito.

- Presentar una textura superficial adecuada a las velocidades de circulación de los vehículos, además de poseer una regularidad superficial en función de las longitudes de onda de las deformaciones.

### 1.1.1. Clasificación de los pavimentos

Generalmente los pavimentos se clasifican en (Montejo Fonseca, 1998):

- **Pavimentos Flexibles**

Está conformado por una carpeta bituminosa, misma que se apoya sobre dos capas, base y subbase, así como se muestra en la Figura 2 y dependiendo de las particularidades de la obra, se puede prescindir de una de ellas.

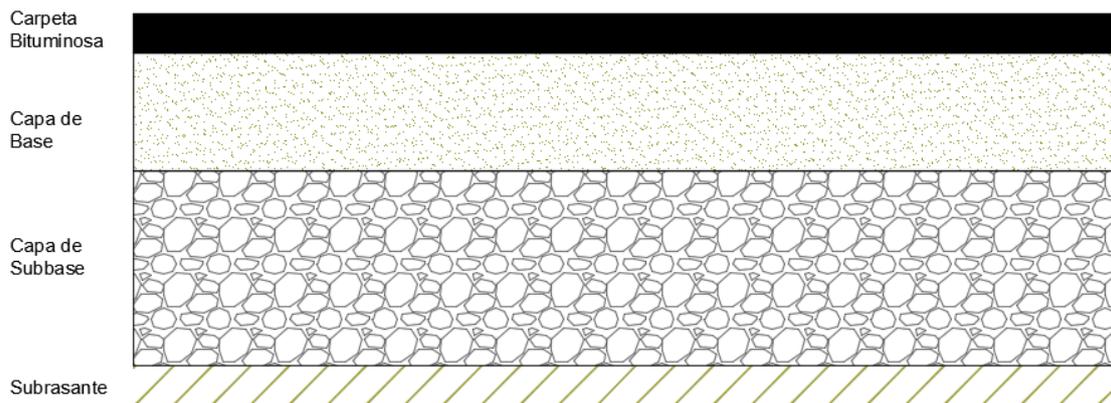


Figura 2. Estructura del pavimento flexible.

- **Pavimentos Rígidos**

Están constituidos principalmente por una losa de concreto hidráulico, el cual está apoyado directamente sobre una capa de subbase o sobre la subrasante del terreno. La resistencia de la losa define la capacidad estructural de este pavimento, es así, que la distribución de los esfuerzos producidos por la losa se efectúa en una zona muy amplia, esto debido a su alta rigidez y al elevado coeficiente de elasticidad del concreto.

La Figura 3 muestra la estructura típica de la superposición de las capas para este tipo de pavimento.

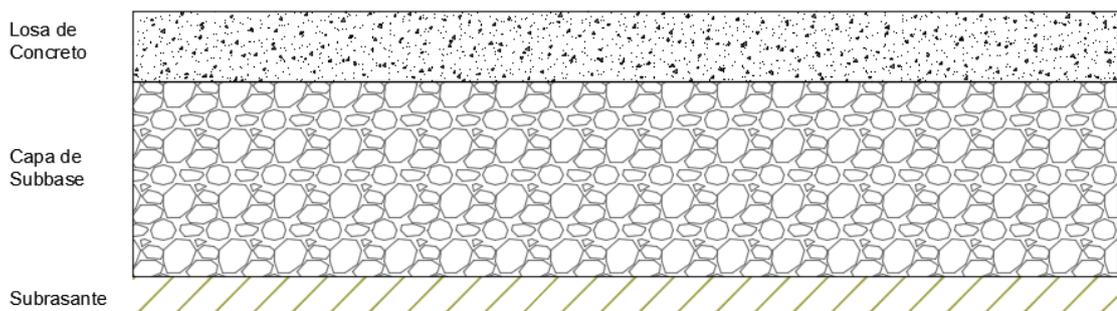


Figura 3. Estructura del pavimento rígido.

- **Pavimentos Semi – Rígidos**

Estos pavimentos siguen la misma estructura básica de los pavimentos flexibles, aunque una de sus capas está rigidizada artificialmente con aditivos como asfalto, emulsión, cal, químicos y cemento. Comúnmente para mejorar, corregir o modificar las propiedades mecánicas de los materiales locales que no son adecuados para la construcción de las capas de un pavimento, se emplean estos aditivos antes mencionados.

- **Pavimentos Articulado**

La capa de rodadura que conforma los pavimentos articulados está compuesta por bloques de concretos prefabricados, más conocidos como adoquines, los cuales son iguales y tienen un espesor uniforme entre sí, que están situadas sobre una delgada capa de arena, la misma que se apoya generalmente sobre una capa de base granular o directamente sobre la subrasante, así como se lo puede observar en la Figura 4.

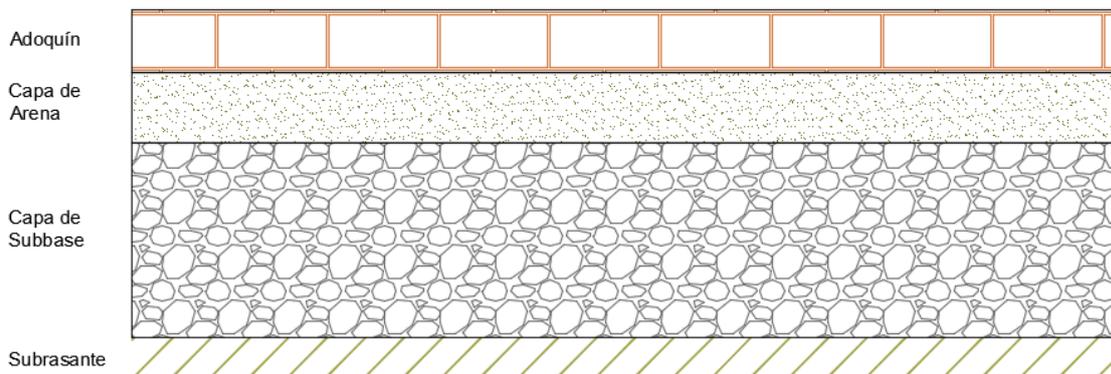


Figura 4. Estructura del pavimento articulado.

## 1.2. Pavimentos flexibles

Dado que la presente investigación está centrada en el análisis de los pavimentos flexibles, es necesario conocer la estructura de los mismos.

### 1.2.1. Estructura del pavimento flexible

En la Figura 2 se aprecia la estructura de un pavimento flexible, en el cual cada capa tiene las siguientes funciones (Montejo Fonseca, 1998).

**1.2.1.1. Capa de rodadura:** Denominada también carpeta asfáltica tiene las siguientes funciones.

- Superficie de rodamiento: Debe garantizar una textura estable, color adecuado, una superficie uniforme que pueda resistir los efectos abrasivos proporcionados por el tránsito.
- Resistencia: La capacidad de la estructura de un pavimento se complementa con la resistencia a la tensión.



- Impermeabilidad: Es indispensable impedir el ingreso de agua al interior del pavimento.

**1.2.1.2. Capa de base:** Se tiene las siguientes funciones.

- Resistencia: Transmite los esfuerzos producidos por el flujo vehicular a la subbase y subrasante.
- Económica.

**1.2.1.3. Capa de subbase**

- Disminución de deformaciones: Los cambios volumétricos en la subrasante debido a los cambios extremos de temperatura o al contenido de agua pueden absorberse en la capa de subbase, lo que impide que estas deformaciones se vean reflejadas en la superficie de rodamiento.
- Capa de transición: Un buen diseño de la subbase impide que los materiales que conforman la base penetren en la subrasante, además la capa de subbase debe actuar como un filtro de la base, evitando que la calidad se vea afectada por los finos de la subrasante.
- Resistencia: Las capas superiores transmiten las cargas de los vehículos, por lo que la subbase debe soportar estos esfuerzos y al mismo tiempo transmitirlos adecuadamente a la subrasante.
- Drenaje: El agua que se introduzca a través de las bermas o de la carpeta debe ser en lo posible drenada por la subbase, así también como lograr impedir la ascensión capilar.
- Económica.

**1.2.1.4. Subrasante**

- Resistencia: Dependiendo del espesor propuesto para el pavimento se evalúa la calidad de la subrasante, pues dicha capa emplea la capacidad de resistir las deformaciones por los esfuerzos cortantes producto de las cargas del tránsito. Además, es fundamental considerar la sensibilidad del suelo a la humedad, ya que consigo puede producir cambios de volumen en el suelo de la subrasante, que puede ser de carácter expansivo provocando severos daños en las estructuras que se apoyan sobre esta capa.

**1.3. Mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas representan una de las partes más importantes en la estructura del pavimento flexible, pues constituye la superficie visible del pavimento y por la cual transitan vehículos diariamente. Se define como una combinación de agregados pétreos y ligante asfáltico que se aglomeran de tal manera que el ligante cubre totalmente la superficie de los agregados (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).



El diseño de las mezclas asfálticas se las realiza por el método Marshall y su dosificación depende de las propiedades que se quieran alcanzar y del comportamiento funcional que se le va a dar al pavimento.

### **1.3.1. Tipos de mezclas asfálticas**

Las mezclas asfálticas se pueden clasificar según su temperatura y son (Yepes, 2014) (Br. Torres Martínez, 2019):

**1.3.1.1. Mezclas asfálticas en frío o Friller:** este tipo de mezclas usa como ligante emulsiones bituminosas debido a su baja viscosidad y no se necesitan calentar previamente los agregados pétreos.

La mezcla no debe alcanzar más allá de 60°C para su posterior compactación; este tipo de mezcla se usa en carreteras secundarias.

**1.3.1.2. Mezclas asfálticas en caliente:** se las denomina así ya que se debe calentar el agregado pétreo y el ligante asfáltico antes del mezclado; el ligante se calienta para bajar la viscosidad y para que se mezcle adecuadamente con el agregado; el mezclado alcanza temperaturas de hasta 140°C para su posterior compactación.

Este tipo de mezclas se usan en todo tipo de vías y son las más comunes en nuestro medio.

### **1.3.2. Propiedades de una mezcla asfáltica en caliente**

Poder cumplir con las propiedades de estabilidad, impermeabilidad, durabilidad, trabajabilidad, resistencia a la fatiga, flexibilidad y resistencia al deslizamiento asegura que el diseño de una mezcla asfáltica en caliente sea considerada de buena calidad, duradera y estable (Asphalt Institute, 2014).

El diseño de una mezcla asfáltica tiene por objetivo primordial garantizar que dicha mezcla posea todas las características antes mencionadas, por lo que resulta indispensable conocer el significado de cada propiedad, como se representa en términos de rendimiento y como son evaluadas.

Las propiedades más relevantes dentro de una mezcla asfáltica en caliente son (Asphalt Institute, 2014):

#### **1.3.2.1. Estabilidad**

La capacidad de resistir deformaciones y desplazamientos producto de las cargas del tránsito es conocida como estabilidad, el cual bajo cargas repetidas debe ser capaz de conservar su forma y lisura. Por otra parte, cuando un pavimento es inestable llega a desarrollar ahuellamientos, ondulaciones o corrugaciones y demás señales que indican un cambio en la mezcla.

Factores como la cohesión interna de las partículas del agregado y la fricción definen la estabilidad, ya que directamente se relaciona la cohesión con la



capacidad ligante del asfalto; en cambio la fricción está relacionada con las características físicas del agregado, forma y textura superficial. Si las partículas de un agregado tienen mayor angularidad y si estas tienen una textura superficial muy áspera, mayor resultará la estabilidad de la mezcla.

Adicionalmente, la temperatura juega un papel muy importante en la estabilidad pues, a medida que disminuye esta, la viscosidad del asfalto aumenta y por ende la cohesión también, llegando a una relación directamente proporcional entre la cohesión y el contenido del asfalto. Por otra parte, es indispensable tomar en cuenta, que, si el contenido de asfalto sobrepasa el nivel, puede llegar a producir un efecto contraproducente, generando en las partículas del agregado una capa demasiado gruesa de esta película ocasionando la pérdida de fricción entre estas.

### **1.3.2.2. Durabilidad**

La capacidad de resistir factores como cambios en las propiedades del asfalto, desintegración del agregado y la separación de la película del asfalto, producto de la acción del tránsito, el clima o la propia combinación de áridos, es más conocida como durabilidad.

Entre los factores que mejoran la durabilidad en una mezcla asfáltica está el lograr la máxima impermeabilidad, diseñando y compactando la mezcla; usar una graduación que sea densa, en lo posible resistente a la separación y finalmente usar una mayor cantidad de asfalto.

A mayor cantidad de asfalto que se use en la mezcla, mayor será la durabilidad debido a la formación de una película gruesa de asfalto, la cual a diferencia de las películas delgadas, no envejece rápido. Un aspecto a considerar en el diseño de las mezclas es el porcentaje de vacíos en el pavimento, pues gracias a esto se permite la expansión del asfalto en épocas cálidas, lo que conlleva a buscar el contenido máximo de asfalto, con la finalidad de sellar dicho porcentaje y hacer más difícil la penetración del agua y del aire.

Un contacto más cercano entre las partículas del agregado, solo se logra con una graduación densa, si el agregado es duro y firme es capaz de resistir la acción del tránsito y del agua que tiende a desintegrar la película de asfalto de las partículas del agregado.

### **1.3.2.3. Impermeabilidad**

La impermeabilidad es una característica que está íntimamente relacionada con el contenido de vacíos en la mezcla asfáltica compactada, ya que se encarga en la resistencia al paso del agua y del aire hacia su interior. El grado de impermeabilidad es determinante en la durabilidad de las mezclas pues siempre debe estar dentro de los límites especificados.



#### **1.3.2.4. Trabajabilidad**

Una buena mezcla asfáltica es aquella que posee dos características primordiales, de fácil colocación y fácil compactación. Sin embargo, para lograr dichas características se debe trabajar con una buena granulometría y un buen tipo de agregado.

En ocasiones, el trabajar con un porcentaje alto de agregado grueso conlleva a una segregación durante su manejo, seguido de una difícil compactación, por lo que resulta especialmente indispensable asegurar la trabajabilidad en lugares donde se requiera colocar a mano considerables cantidades de mezcla.

Por otra parte, las mezclas que son muy trabajables o muy deformables son conocidas como mezclas tiernas y usualmente son el resultado de una falta de relleno mineral, partículas lisas o redondeadas, demasiada arena de tamaño mediano y exceso de humedad en la mezcla.

La trabajabilidad puede verse afectada en ocasiones por el grado y el porcentaje de asfalto; de hecho, trabajar con temperaturas demasiado bajas provocará que la mezcla sea poco trabajable, mientras que temperaturas altas pueden volver tierna a la mezcla.

#### **1.3.2.5. Flexibilidad**

Una de las características deseables cuando se diseñan pavimentos es la flexibilidad, ya que le ofrece al pavimento la capacidad de acomodarse sin que ocurra agrietamiento frente a los movimientos y asentamientos graduales que se produce en la subrasante.

Un pavimento puede ser más flexible si trabaja con una granulometría abierta con alto contenido de asfalto, pero esta circunstancia no siempre resulta beneficiosa si se toma en cuenta la estabilidad en la mezcla, por lo que se debe siempre buscar un equilibrio entre los mismos.

#### **1.3.2.6. Resistencia a la fatiga**

La resistencia ante las cargas repetidas de tránsito es más conocida como resistencia a la fatiga o a la flexión. La vida de un pavimento depende de las características del espesor y resistencia y además de la capacidad de soporte de la subrasante.

Entre mayor sea el espesor del pavimento sobre la subrasante y sometida a cargas repetidas del tránsito, esta no se flexionará, a diferencia de cuando se trabaje con espesores delgados. Además, existe una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de vacíos y la resistencia a la fatiga, ya que a través de factores como la falta de compactación o el mismo diseño provocan que el porcentaje de vacíos incremente, mientras la resistencia a la fatiga va disminuyendo.

### 1.3.2.7. Resistencia al deslizamiento

Es la capacidad de minimizar el efecto resbaladizo existente entre las ruedas de un vehículo y la superficie del pavimento, especialmente cuando este se encuentre mojado, de tal forma que no se produzca un hidroneo producto de la formación de dicha película de agua. La resistencia al deslizamiento se evalúa en campo, con una rueda normada y trabajando con condiciones controladas de humedad y velocidad de 65 km/h.

Mientras más áspera y rugosa sea la superficie del pavimento, mayor resistencia al deslizamiento se obtendrá, lo que conlleva a trabajar con una gradación abierta, cuyo tamaño máximo del agregado esté entre el rango de 9.5 mm (3/8 pulgadas) a 12.5 mm (1/2 pulgada).

### 1.3.3. Parámetros volumétricos y gravimétricos en mezclas asfálticas

Para considerar el comportamiento de una mezcla asfáltica es indispensable analizar las proporciones volumétricas y gravimétricas, tanto del asfalto como de los componentes del agregado.

Entre las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica se destacan los vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos llenos de asfalto (VFA) y el contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ ), mismos que ayudan a entender el comportamiento de una mezcla asfáltica, que puede ser realizada en laboratorio o probetas asfálticas extraídas de campo.

A continuación, en la Figura 5 se representa un esquema de los componentes de una mezcla asfáltica compactada, misma que ayuda a entender de manera visual las propiedades de masa y volumen.

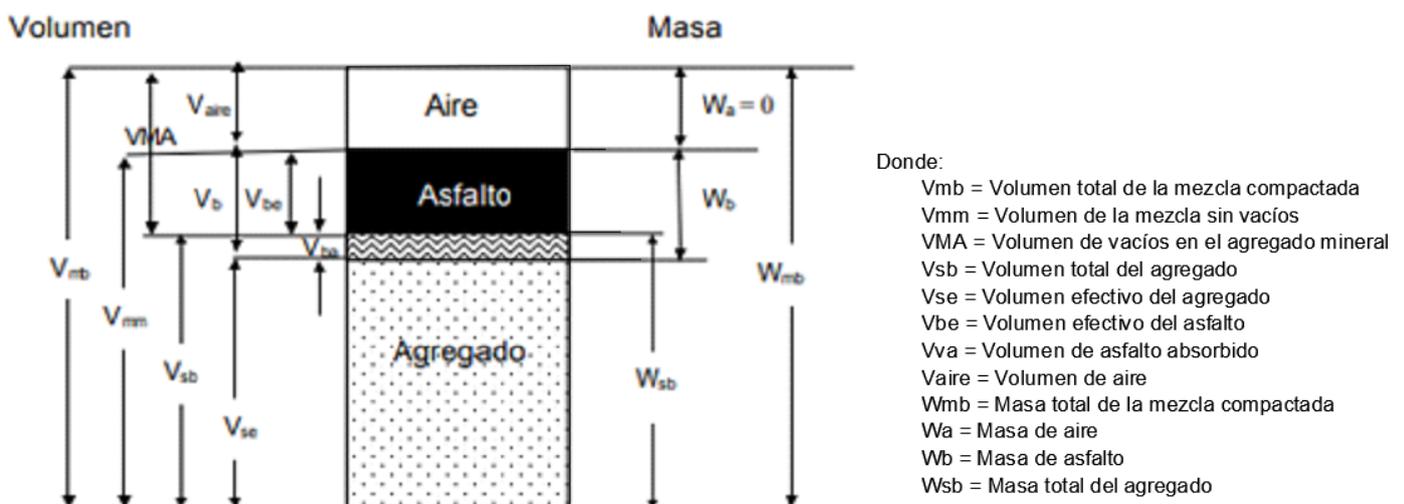
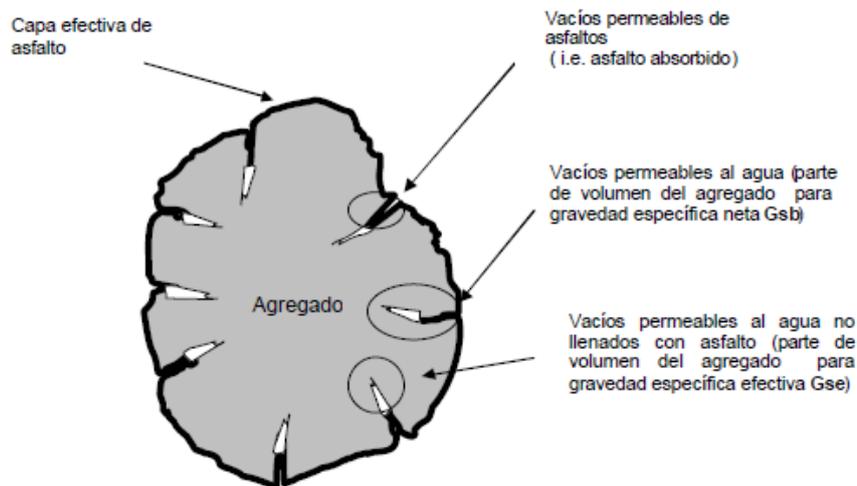


Figura 5. Componentes de una mezcla asfáltica compactada.  
Fuente: Asphalt Institute SP-2, 1996.

Las mezclas asfálticas compactadas también deben ser analizadas con respecto a la masa específica relativa o gravedad específica, razón por la cual es necesario conocer la relación existente entre las masas de volumen de una sustancia con respecto al agua, bajo una misma temperatura.

Para mejorar la comprensión y entender los volúmenes dentro la mezcla asfáltica se presenta la Figura 6.



.Figura 6. Parámetros de diseño volumétrico.  
Fuente: Asphalt Institute MS-2, 1996.

### 1.3.3.1. Gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ )

Esta relación considera únicamente el volumen de los poros permeables junto con la masa de igual volumen de agua, es decir, corresponde a la masa en aire de un volumen unitario de agregado, la misma que debe estar medida a una misma temperatura (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

A través de la Ecuación 1 se puede calcular la gravedad específica neta del agregado.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_N}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_N}{G_N}}$$

Ecuación 1.

Donde:

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta de la mezcla de agregados.

$P_1, P_N$  = Porcentajes individuales por masa del agregado.

$G_1, G_N$  = Gravedad específica neta individual del agregado.



### 1.3.3.2. Gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ )

Esta relación considera únicamente el volumen de poros permeables al agua que no estén colmatados de cemento asfáltico y la masa de igual volumen de agua, es decir, la masa en aire de un volumen unitario de agregado, la cual debe estar medida a la misma temperatura (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

Mediante la Ecuación 2 que se muestra se puede determinar la gravedad específica:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\frac{P_{mm}}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}}$$

*Ecuación 2.*

En donde:

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.

$G_{mm}$  = Gravedad específica máxima del ensayo RICE.

$P_{mm}$  = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta.

$P_b$  = Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo RICE.

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto.

### 1.3.3.3. Gravedad específica máxima de la mezcla asfáltica ( $G_{mm}$ )

Más conocida como la gravedad específica RICE, la cual relaciona la masa del volumen dado de la mezcla asfáltica sin vacíos de aire con la masa de igual volumen de agua, cuando están medidos a la misma temperatura (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

A través de la norma ASTM D 2041/AASHTO T 209 se puede determinar la gravedad específica máxima para cada contenido de asfalto y su resultado se expresa a través de la Ecuación 3.

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\frac{P_s}{G_{se}} + \frac{P_b}{G_b}}$$

*Ecuación 3.*

Donde:

$G_{mm}$  = Gravedad específica máxima de la mezcla del pavimento (sin vacíos de aire).

$P_{mm}$  = Porcentaje de masa del total de la mezcla suelta.

$P_s$  = Contenido de agregado, porcentaje del total de la mezcla asfáltica.

$P_b$  = Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo RICE.

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto.

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.



#### 1.3.3.4. Gravedad específica del asfalto ( $G_b$ )

Esta gravedad representa la relación entre la masa en aire del volumen dado de asfalto y la masa de agua de igual volumen, cuando son medidos a la misma temperatura (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

#### 1.3.3.5. Gravedad específica total de la mezcla asfáltica compactada ( $G_{mb}$ )

Representa la relación entre la masa en aire del volumen dado de la mezcla asfáltica compactada y la masa de agua de igual volumen, cuando éstas están sometidas a la misma temperatura (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

#### 1.3.3.6. Absorción del asfalto

En la Ecuación 4 se expresa el cálculo para la absorción del asfalto, la cual está definida como porcentaje de la masa del agregado.

$$P_{ba} = \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} G_{se}} \times 100 \times G_b$$

*Ecuación 4.*

Donde:

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido.

$G_b$  = Gravedad específica del asfalto.

$G_{se}$  = Gravedad específica efectiva del agregado.

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta para el agregado total.

#### 1.3.3.7. Contenido de asfalto efectivo

Hace referencia al contenido total de asfalto, el cual forma una capa exterior en las partículas del agregado y define el desempeño de la mezcla asfáltica. Se lo puede calcular a través de la Ecuación 5, mediante una diferencia entre el volumen total de asfalto y la cantidad que ha perdido, producto de la absorción dentro de las partículas del agregado (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

$$P_{be} = P_b - \frac{P_{ba}}{100} \times P_s$$

*Ecuación 5.*

Donde:

$P_{be}$  = Contenido de asfalto efectivo, en porcentaje de la masa total de la mezcla.

$P_{ba}$  = Porcentaje de asfalto absorbido.

$P_s$  = Contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

$P_b$  = Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo RICE.



### 1.3.3.8. Porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA)

En la Ecuación 6 se expresa el cálculo para el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, mismo que se define como los espacios intergranulares de vacíos existentes en las partículas del agregado de una probeta compactada (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} \times P_s}{G_{sb}}$$

*Ecuación 6.*

Donde:

VMA = Vacíos en el agregado mineral.

$G_{mb}$  = Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.

$P_s$  = Contenido de agregado, porcentaje total de la masa de la mezcla.

$P_b$  = Contenido de asfalto con el cual se desarrolló el ensayo RICE.

$G_{sb}$  = Gravedad específica neta para el agregado total.

### 1.3.3.9. Porcentaje de vacíos de aire ( $V_a$ )

La Ecuación 7 expresa el cálculo para encontrar el porcentaje de vacíos de aire, los cuales se definen como volúmenes pequeños de aire presentes entre los agregados revestidos que están dentro de la mezcla asfáltica compactada (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

$$V_a = 100 \times \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}}$$

*Ecuación 7.*

Donde:

$V_a$ : Vacíos de aire en porcentaje del volumen total.

$G_{mm}$ : Gravedad específica máxima (Ensayo RICE).

$G_{mb}$ : Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada.

### 1.3.3.10. Porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA)

La ecuación 8 expresa el cálculo para determinar el VFA, el cual se define como un porcentaje existente de vacíos intergranulares entre las partículas de los agregados llenos de asfalto (Garnica Anguas, Flores Flores, Gómez López, & Delgado Alamilla, 2005).

$$VFA = \frac{VMA - V_a}{VMA}$$

*Ecuación 8.*

Donde:

VFA: Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto.

$V_a$ : Porcentaje de vacíos.

VMA: Porcentaje de vacíos en el agregado mineral.



## 1.4. Áridos

Conocidos comúnmente como materiales granulares, constituyen entre el 90 al 95%, en peso, y entre 75 al 85%, en volumen, de las estructuras de un pavimento. Los áridos más utilizados son arena, piedra triturada, grava, polvo de roca y escoria, puesto que son materiales minerales duros, e inertes que generalmente se usan en forma de partículas fragmentadas o graduadas (Asphalt Institute, 2014).

### 1.4.1. Propiedades físicas de los áridos

Para que un árido sea considerado de buena calidad y apropiado para un pavimento asfáltico, debe cumplir con las siguientes propiedades (Asphalt Institute, 2014):

- **Graduación y tamaño máximo de partículas**  
La distribución por tamaño de partícula dentro de los agregados es generalmente conocida como graduación del agregado, la misma que es necesaria para determinar si cumple o no con las especificaciones técnicas.
- **Limpieza**  
Los materiales indeseables como vegetación, terrones, arcilla, entre otros, al estar en cantidades excesivas llegan a afectar desfavorablemente el comportamiento del pavimento, es por esta razón que el agregado debe estar limpio antes de ser utilizado.
- **Dureza**  
Durante la producción, colocación y compactación de las mezclas asfálticas, así como también durante la vida útil de un pavimento, los áridos deben tener la capacidad de resistir al desgaste y la degradación irreversible.
- **Textura superficial**  
Un pavimento con una textura superficial áspera está íntimamente relacionado con el aumento de la resistencia, ya que evita que las partículas del agregado se muevan entre ellas.
- **Capacidad de absorción**  
Todos los agregados tienen la capacidad de absorber líquidos (agua o asfalto) y dependiendo de la cantidad en que lo haga, se definirá si este es poroso o no.
- **Afinidad con el asfalto**  
Conocida como la tendencia del árido para retener una capa de asfalto.
- **Peso específico**  
Una forma muy común de expresar las características de peso y volumen de los materiales, es mediante el peso específico. Este relaciona el peso



de un volumen dado de cualquier agregado y el peso de un volumen igual de agua.

### 1.5. Vidrio

El vidrio es uno de los materiales más usados por el hombre y lo ha acompañado a lo largo de su historia, pues se han encontrado vestigios de adornos hechos con vidrio hace 2500 años A.C. en la antigua Mesopotamia; la fabricación del vidrio era artesanal hasta que llegó la revolución industrial y su proceso de fabricación se transformó hasta lo que conocemos hoy en día mediante el uso de máquinas automatizadas (Almeida Beltrán & Trujillo Vivas, 2017).

La American Society for Testing Material (ASTM) define al vidrio como un *“Producto inorgánico de fusión, el cual se ha enfriado hasta un estado rígido, pero sin sufrir cristalización”*.

La principal materia prima usada para la fabricación del vidrio es arena de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) y la caliza ( $\text{CaCO}_3$ ); sin embargo, se utiliza otras adiciones de materiales ocasionando una diversidad de vidrios y entre los principales tipos se tiene (Almeida Beltrán & Trujillo Vivas, 2017):

- **Vidrios sodo - cálcicos:** Están formados por un 70 - 75% de sílice, 12 - 18% de sodio y entre 5 - 14% de calcio; este tipo de vidrios se funden fácilmente, son resistentes al agua, a los ácidos y son transparentes, además, el costo es económico debido a la facilidad de obtención de la materia prima y por su abundancia en la corteza terrestre.
- **Vidrios de plomo:** El óxido de calcio es reemplazado por óxido de plomo, esto ocasiona que el vidrio sea mucho más denso que los otros tipos y esta característica le da mayor poder de refracción y dispersión. El uso de este tipo de vidrio está presente en lámparas fluorescentes y televisión, vidrios ópticos, decorativos y ventanas.
- **Vidrios de borosilicato:** En este tipo de vidrios el óxido de silicio es sustituido por el óxido de boro, esto hace que el material sea difícil de fundir lo que ocasiona menor expansión y se reduce su reblandecimiento, esta última característica es necesaria y primordial para la fabricación de equipos de laboratorio, hornos y faros.

#### 1.5.1. Propiedades del vidrio

Las propiedades del vidrio dependen de la composición que este posea; el tipo de vidrio usado para este trabajo de investigación es el vidrio sodo – cálcico, debido a que este representa todo el vidrio de uso común en el mundo como por ejemplo las botellas, vasos adornos, entre otros.

Entre las principales propiedades se tiene (Almeida Beltrán & Trujillo Vivas, 2017) (Br. Torres Martínez, 2019):



- El vidrio soporta temperaturas bastante altas, su transformación de sólido a líquido inicia entre los 500 - 600°C, y a 1500°C se da el proceso de fusión, donde su viscosidad es tan baja que puede colarse y estirarse fácilmente.
- Es frágil debido a que en su superficie posee fisuras casi imperceptibles que reducen su resistencia mecánica, sin embargo, su dureza es relativamente buena ya que en la escala de Mohs se ubica entre 6 y 7, esto debido a su estructura molecular pues los átomos de sodio y calcio forman cadenas amorfas irregulares que mejora la respuesta a impactos.
- Tiene una densidad de 2.5 g/cm<sup>3</sup>, pero esta disminuye notablemente cuando se somete al vidrio a altas temperaturas.
- El vidrio por su composición es resistente a medios ácidos como el ácido fluorhídrico, fosfórico, sulfúrico y los álcalis entre estos está los hidróxidos, carbonato de sodio y potasio, sin embargo, el vidrio resiste mejor a medios ácidos que a los álcalis.
- El vidrio no se considera un buen conductor térmico pues al aplicar calor en una superficie no se tiene la misma temperatura en toda ella, lo cual puede ocasionar que el vidrio se fisure.
- En estado sólido el vidrio tiene un índice de conductividad térmica bajo por lo cual a temperatura ambiente se considera un buen aislante térmico, pero a altas temperaturas la conductividad térmica es similar a la del hierro fundido.
- A altas temperaturas el vidrio tiene un comportamiento plástico, pero a temperatura ambiente se considera un material elástico ideal, aun cuando su deformación es pequeña al aplicar una fuerza y fracturarse cuando llega al límite elástico; el módulo elástico puede estar entre 700 y 720 GPa.
- Teóricamente, la resistencia a tracción es 5 veces mayor a la del acero, pero a través de ensayos se obtuvo un valor de 1000 kg/cm<sup>2</sup> y esta se ve disminuida en casi el 40% en su valor cuando se incrementa la temperatura en el vidrio.
- La resistencia a la flexión y la compresión se ven afectadas por las microfisuras en la superficie del vidrio, esto le afecta mayormente a la resistencia a flexión, no obstante, posee una gran resistencia a ser comprimido, pues su valor está alrededor 1000 kg/cm<sup>2</sup>.

### **1.5.2. Vidrio como agregado en mezclas asfálticas**

El vidrio es un material que se puede reutilizar en su totalidad pues se puede procesar varias veces para la fabricación de nuevos productos o reutilizarlos con su misma función inicial e incluso se puede usar en el campo de la construcción; sin embargo, según la página web del Ministerio del Ambiente y el Agua en el Ecuador (Ministerio del Ambiente y Agua, s.f.) solo el 19% del total del vidrio que



llega a los vertederos se recicla y el resto de porcentaje solo ayuda a acrecentar la contaminación ambiental existente en el país.

En Estados Unidos en los años 60's y 70's notaron el gran potencial que tenía el usar el vidrio como sustituto de los agregados en las mezclas asfálticas en caliente y se usó el vidrio triturado para pavimentar alrededor de 33 lugares en distintas ciudades de EEUU y Canadá, para los años 80's se diseñó e inicio operaciones de una planta procesadora de vidrio para la fabricación de pavimentos (SEPRO S.A.S., 2020).

El uso de vidrio en las mezclas asfálticas también se les denomina "Glassphalt" y no es más que la misma mezcla asfáltica caliente convencional con alrededor del 1% hasta el 20% del agregado fino sustituido por vidrio. Además, se le atribuye al vidrio ofrecer ciertos beneficios a la mezcla asfáltica que normalmente esta no posee.

Entre los principales beneficios se tiene (Tahmoorian, Samali, Yeaman, & Crabb, 2018):

- Incremento de la estabilidad ante la presencia de vidrio lo cual se traduce en que a mayores presiones que esta soporta, menores podrían ser los espesores de la capa de la carpeta asfáltica.
- La seguridad vial en presencia del agua es mejor pues la baja absorción de las partículas de vidrio ayuda a que el pavimento seque más rápido luego de una lluvia.
- Las partículas de vidrio por su forma y textura ayudan a la trabajabilidad de la mezcla.
- Las superficies del asfalto con vidrio son más reflectantes que el asfalto convencional lo cual hace que la visibilidad de la vía en la noche sea mejor.
- El vidrio hace que la mezcla asfáltica retenga por más tiempo el calor lo cual facilita la compactación y el transporte de la misma cuando se trata de distancias largas.
- El alto grado del ángulo de fricción de las partículas de vidrio y su angularidad ayuda a la estabilidad lateral, característica positiva cuando frena y arranca el vehículo.
- Mejora la resistencia al agrietamiento por temperatura debido al bajo coeficiente de dilatación del vidrio.
- Si se usa partículas de vidrio iguales o menores a 4.75 mm se nota una ligera ayuda a la resistencia del deslizamiento lo cual ofrece una ventaja cuando el pavimento está en contacto con el agua y así evitar el hidroplaneo.
- Reducción significativa en el costo de la materia prima pues se reemplaza el vidrio por arena, además como el vidrio no absorbe betún el contenido



óptimo del mismo es menor y esto influye positivamente en el costo de la mezcla.

- Ayuda a reducir los desechos de vidrio en vertederos lo cual es un beneficio medioambiental.
- Utiliza el mismo método de construcción de mezclas asfálticas calientes convencionales.

A pesar de las ventajas antes descritas se tiene que hacer notar que el vidrio puede ocasionar algunos problemas al momento de trabajar la mezcla, entre ellos se tiene:

- Poca adherencia entre el betún y las partículas de vidrio pues como estas son lisas y con baja absorción, ocasiona que el betún no se adhiera y se desprenda con facilidad, para evitar este problema se usa del 1 al 2 % del peso de la mezcla asfáltica de cal hidrata.
- En el día se puede incrementar la reflexión del pavimento causando mayor resplandor, pero si se usa un porcentaje adecuado de vidrio y partículas pequeñas este problema se evita.
- La presencia de partículas grandes en la mezcla puede provocar que la vida útil de los neumáticos se reduzca.

## **1.6. Cal hidratada**

Denominada químicamente como hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), su nombre se debe a la combinación del óxido de calcio con el agua. A través la unión del metal calcio con dos grupos de hidróxidos, se forma la hidratación o apagado de la cal viva, resultando la formación de la cal hidratada (Aguilar B, Hernández M, & Sibrián H, 2016).

### **1.6.1. Propiedades de la cal hidratada sobre el pavimento**

Es común observar en los pavimentos flexibles la formación de fisuras, que pueden ir desde micro fisuras hasta macro fisuras, llegando a ocasionar daños en la estructura del pavimento. Es aquí donde la incorporación de la cal juega un papel importante, pues ayuda a que dichas grietas no se generen o avancen hasta llegar a provocar ahuellamientos en el pavimento.

Este componente tiene la particularidad de ser un modificador multifuncional, ya que ayuda a reducir el índice de envejecimiento del ligante asfáltico, reducir los daños producto de la humedad, incrementa la durabilidad y estabilidad en las mezclas asfálticas y brinda una mejor adherencia entre los agregados y la película de asfalto (Aguilar B, Hernández M, & Sibrián H, 2016).

## **1.7. Diseño de mezclas asfálticas**

El proceso para diseñar una mezcla asfáltica inicia seleccionando el material, tipo de asfalto, seguido de la compactación de los especímenes elaborados,



cálculo de los parámetros volumétricos y posteriormente la determinación del contenido óptimo de asfalto.

Sin embargo, existen diferentes métodos de diseño de mezclas asfálticas, pero sin duda el más confiable será aquel que proporcione una adecuada interacción entre sus componentes (cantidad de asfalto y agregados) y su comportamiento estructural.

Los métodos más comunes utilizados para el diseño de mezclas asfálticas son (Flores Siguenza & Vázquez Flores, 2017):

- **Método Hveem:** dicho método fue desarrollado en 1940 por Francis N. Hveem, en Estados Unidos.
- **Método Marshall:** este método fue desarrollado en el año de 1943 por Bruce Marshall, en Estados Unidos.
- **Método Superpave** (Superior Performance Asphalt Pavements): este método fue desarrollado entre los años 1987 a 1993 por el programa Strategic Highway Reserch Program, en Estados Unidos.

En Ecuador, el método más utilizado para diseñar una mezcla asfáltica es el método Marshall; el cuál cumple con las especificaciones y normativas propuestas por la MTOP. Por consiguiente, para la realización de esta investigación se empleará dicho método.

#### 1.7.1. Método Marshall

El concepto del método Marshall usado hasta la actualidad, nace a mediados de los años 40's de la mano de Bruce Marshall, mismo que laboraba como Ingeniero en el Departamento de Autopistas perteneciente al estado de Mississippi; luego este método fue adoptado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, donde a través de varios estudios, correlaciones e investigaciones; realizó una evaluación y comparación entre varios métodos para lograr el diseño y control de mezclas asfálticas (Flores Siguenza & Vázquez Flores, 2017).

Originalmente, dicho método era solo aplicable para mezclas asfálticas en caliente, con agregados que contengan un tamaño máximo nominal igual o menor a 25 mm (1"). Luego se desarrolló el método Marshall modificado, el cual es aplicable para agregados cuyo tamaño máximo nominal sea igual a 38 mm (1.5") o mayor. Además, se agregó detalles en el diseño en laboratorio y el control en campo de las mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa.

La metodología Marshall tiene las características de ser económico y sencillo de obtener resultados, por lo que es muy usado en laboratorio con la finalidad de encontrar la resistencia de las mezclas asfálticas. Utiliza especímenes de prueba estándar cuyas medidas son 63.5mm (2 ½") de alto y 101.6 mm (4") de diámetro; una breve descripción del procedimiento tomando como referencia la norma



ASTM D1559 consiste en calentar, combinar y compactar la mezcla de asfalto con agregado, para finalmente obtener las propiedades de densidad, análisis de vacíos, estabilidad y flujo de los especímenes ya compactados (Asphalt Institute, 2014).



## CAPITULO 2: METODOLOGÍA DEL DISEÑO DE MEZCLAS

---

Las normativas vigentes en el Ecuador encargadas de los métodos de ensayos y materiales que conforman una mezcla asfáltica son la Norma Ecuatoriana Vial (NEVI-12) y el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOB).

A continuación, se describe la metodología seguida referente a la caracterización de los materiales y los ensayos mecánicos efectuados en las mezclas asfálticas compactadas, los cuales fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Geotecnia de la Universidad de Cuenca.

### **2.1. Caracterización de agregados para mezclas asfálticas**

Para un buen diseño de las mezclas asfálticas es fundamental realizar un control de calidad en los componentes (áridos y cemento asfáltico) que van a ser utilizados; además es necesario incluir al vidrio dentro de este análisis con el fin de que satisfaga los requerimientos establecidos en el diseño.

#### **2.1.1. Áridos**

Las características que definen a los áridos minerales dependen principalmente de la fuente de origen de estos, por lo que la caracterización de los agregados en laboratorio es un procedimiento preliminar para la obtención de la combinación de los mismos.

Los ensayos efectuados para los áridos grueso y fino siguen la normativa propuesta por la ASTM (American Society Testing and Materials) y por su equivalente en las normas AASHTO (American Association of State Highway on Transportation Officials), los cuales deberán cumplir con las Especificaciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas y la Norma Ecuatoriana Vial.

##### **2.1.1.1. Análisis granulométrico**

La granulometría se encarga en determinar la distribución por tamaño de las partículas de los agregados finos y gruesos que van a ser utilizados para la fabricación de las mezclas asfálticas en caliente (ASTM C136M, 2010).

Siguiendo la normativa propuesta por el Instituto Ecuatoriano de Vialidad, en el capítulo 800, sección 811: "Agregados para Mezclas Bituminosas", se deberá verificar los requisitos de graduación propuestos en la Tabla 1, donde se describe la franja granulométrica que debe cumplir, según el tamaño máximo nominal del agregado utilizado.



Tamaño Tamiz [mm]	Tamaño Nominal Máximo del Agregado [mm]			
	19	12.5	9.5	4.75
	Material más fino que cada tamiz (malla cuadrada), % que pasa en peso			
25	100			
19	90 a 100	100		
12.5		90 a 100	100	
9.5	56 a 80		90 a 100	100
4.75	35 a 65	44 a 74	55 a 85	80 a 100
2.36	23 a 49	28 a 58	32 a 67	65 a 100
1.18				40 a 80
0.6				25 a 65
0.3	5 a 19	5 a 21	7 a 23	7 a 40
0.15				3 a 20
0.075	2 a 8	2 a 10	2 a 10	2 a 10

Tabla 1. Requisitos de graduación para mezclas asfálticas densas (Marshall).

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012.

### 2.1.1.2. Abrasión o desgaste del agregado grueso

Un indicador de la calidad del árido es sin duda la resistencia a la abrasión de los agregados, pues depende principalmente de las características de la roca madre. En pavimentos, las partículas de suelo van a estar sometidas a la acción continua del tráfico o de las cargas repetidas sobre este, por lo que se espera que los agregados sean resistentes al roce continuo entre las partículas y que se asegure que la mezcla asfáltica pueda ser construida, colocada y compactada adecuadamente (Orellana Orellana & Solano Mosquera, 2019).

El método utilizado en laboratorio para determinar la resistencia al desgaste, es empleando la máquina de los Ángeles, bajo las especificaciones de la norma ASTM C131 o su equivalente la norma AASHTO T-96: “Método estándar de prueba para determinar la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles”.

A continuación, se presenta la Tabla 2 con las tolerancias que debe cumplirse para dicho ensayo.

Norma	Descripción	Tolerancias	
		Mínimo	Máximo
AASHTO T 96	Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles	-	40%

Tabla 2. Requisitos del agregado grueso para mezclas asfálticas.

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Vialidad, 2012.

### 2.1.1.3. Peso específico y absorción del agregado

De acuerdo con la norma ASTM C128-15: “Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate” se define el peso específico como “la proporción existente entre el peso de un volumen dado de agregado y el peso de un volumen igual de agua”. Con la finalidad de determinar



el porcentaje de vacíos de aire existentes en una mezcla asfáltica es necesario calcular el peso específico de los agregados.

De la misma manera es indispensable conocer el porcentaje de absorción de un agregado, pues si este es altamente absorbente luego del mezclado inicial este continuará absorbiendo, hasta que en la superficie quede menos asfalto para poder ligar con las demás partículas del agregado. El desarrollo de este ensayo en laboratorio sigue el procedimiento gravimétrico utilizando el picnómetro, el cual está basado en la descripción de la Tabla 3.

Normas	Descripción
ASTM C128, AASHTO T84	“Método de ensayo para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos”.
ASTM C127, AASHTO T85	“Método de ensayo para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados gruesos”.

Tabla 3. Normas para determinar la gravedad específica de los agregados.  
Fuente: Normas ASTM, (ASTM C127, 2015) (ASTM C128, 2015).

### 2.1.2. Cemento Asfáltico

Los productos derivados de petróleo también deben ser sometidos al cumplimiento de los requisitos propuestos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2014).

El cemento asfáltico se puede clasificar dependiendo del grado de penetración, a través de ensayos de penetración que están basados en su consistencia y dureza. La norma NTE INEN 2515, 2014: *“Productos Derivados del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad) Requisitos”*, establece la metodología y los requisitos que el asfalto debe cumplir para ser usado en obras de mantenimiento y construcción de pavimentos.

En la Tabla 4, se describe los ensayos y los requisitos que debe cumplir el asfalto previo a su utilización en una mezcla asfáltica en caliente.



Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Normas de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Viscosidad absoluta, 60°C	Pa s	60±20		100±20		200±40		300±60		420±60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	175	-	250	-	300	-	350	-	400	-	ASTMD 2170
Punto de inflamación	°C	177	-	219	-	232	-	232	-	232	-	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno	%	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-	NTE INEN 915
Gravedad específica 25°C/25 °C		Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD70
Índice de penetración		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		-1.5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio												
Viscosidad, 60°C	Pa s	-	300	-	500	-	800	-	1200	-	2000	ASTMD 2171
Cambio de masa	% w/w	-	1.5	-	1	-	1	-	1	-	1	ASTMD 2872
Ductilidad, 25 °C [77°F], 5 cm/min	cm	100	-	75	-	50	-	40	-	25		NTE INEN 916

Tabla 4. Rangos mínimos y máximos que debe cumplir el cemento asfáltico.

Fuente: (NTE INEN 2515, 2014).

### 2.1.3. Vidrio

Las normas ecuatorianas carecen de una normativa para trabajar con el vidrio como un agregado. En este caso, se emplea la norma AASHTO, por lo cual la curva granulométrica del vidrio triturado deberá cumplir con lo propuesto en la Tabla 5, pues en ella se muestran los rangos propuestos por la norma AASHTO M318: “Standard Specification for Glass Cullet Use for Soil – Aggregate Base Course”.

Tamices	Porcentaje que Pasa	
	Rango Inferior	Rango Superior
9.5	100	100
4.75	70	100
2.38	35	88
1.19	15	45
0.3	4	12
0.075	0	5

Tabla 5. Especificaciones de la norma AASHTO M318.

Fuente: (AASHTO M 318, 2002).

### 2.2. Método de diseño de mezclas asfálticas en caliente

El diseño de una mezcla asfáltica se lo realiza mediante el método Marshall, a continuación, una breve descripción del método de las mezclas asfálticas convencionales y modificadas con vidrio triturado.



### **2.2.1. Mezcla asfáltica convencional**

Previo a la elaboración de una mezcla asfáltica convencional, es necesario realizar ensayos físicos a los agregados con la finalidad de obtener una curva granulométrica, que represente la combinación de áridos que satisfaga la Tabla 1. Requisitos de graduación para mezclas asfálticas densas (Marshall) propuestos por el Instituto Ecuatoriano de Vialidad.

Siguiendo la metodología Marshall, se deberá encontrar el contenido óptimo de asfalto para dicha combinación de áridos. El método para el diseño en laboratorio hace uso de briquetas de 63.5 mm (2.5 pulgadas) de espesor por 101.6 mm (4 pulgadas) de diámetro, donde se elabora una serie mínima de 15 briquetas, que contengan la misma combinación de agregados, pero con variaciones de contenido de asfalto, que puede ir desde el 5 al 7% con incrementos de 0.5% de asfalto. El detalle completo para la elaboración de las briquetas sigue la normativa ASTM D-1559 o su equivalente la norma AASHTO T-245.

Finalmente, las briquetas son ensayadas para poder calcular los parámetros como: estabilidad, flujo, vacíos de aire, vacíos llenos de asfalto, vacíos de agregado mineral y densidad aparente.

### **2.2.2. Mezcla asfáltica modificada con vidrio triturado**

La incorporación de vidrio reciclado en la mezcla asfáltica en caliente consiste en utilizar como árido al vidrio triturado con un tamaño de partícula máximo de 4.75 mm, para lo cual es primordial realizar la caracterización del mismo mediante ensayos de laboratorio. La adición porcentual de vidrio triturado en las mezclas modificadas, será del 5 al 20%, con variaciones del 5% de vidrio.

Además, con el objetivo de lograr una mejor adherencia entre los agregados, la composición de la mezcla asfáltica modificada considera la incorporación del 1% de cal hidratada, ya que este actúa como un aditivo antideslizante (Gutierrez Silvestre, 2018).

Siguiendo la misma metodología descrita anteriormente, la combinación de áridos deberá estar dentro de los rangos establecidos por la normativa NEVI (Norma Ecuatoriana Vial). Sin embargo, para el análisis de este diseño se elaborarán 60 briquetas en total, 15 briquetas por cada contenido de vidrio, que posteriormente serán ensayadas con el objetivo de calcular los parámetros ya antes mencionados.

Finalmente, se realizará una comparación entre la mezcla asfáltica convencional y la modificada con vidrio triturado para evaluar el comportamiento físico – mecánico y un análisis de costo – beneficio para encontrar el porcentaje óptimo de vidrio con el cual la mezcla asfáltica mejora sus propiedades.



### **2.3. Caracterización del diseño de mezclas asfálticas**

A continuación, se describen los ensayos que se van a efectuar en las mezclas asfálticas convencionales y modificadas.

#### **2.3.1. Ensayo Marshall**

Con el propósito de encontrar el contenido óptimo de asfalto para una combinación de agregados específica, se desarrolla el método Marshall que se aplica en mezclas asfálticas en caliente, el cual tiene por objetivo analizar las relaciones entre densidad y volumen de vacíos, y determinar la estabilidad y flujo de las briquetas compactadas.

- **Estabilidad:** Indica el valor de la máxima carga resistida por la biqueta, el cual debe ser multiplicado por el correspondiente factor de corrección, que se encuentra en función del espesor y volumen de la biqueta elaborada (Asphalt Institute, 2014).
- **Flujo:** Indica la deformación de la biqueta desde el momento que comienza la carga hasta que se efectúe la carga máxima durante el ensayo de estabilidad. Está expresada en milímetros con una aproximación de 0.1 mm (Asphalt Institute, 2014).

#### **2.3.2. Ensayo Rice**

Este método determina la gravedad específica y densidad teórica máxima de la mezcla asfáltica bituminosa no compactada a 25 °C, siguiendo la norma ASTM D2041 o AASHTO T209.

A partir del resultado obtenido de este ensayo, se puede determinar el contenido de betún asfáltico absorbido por los agregados de la mezcla, para finalmente conocer la cantidad efectiva de betún asfáltico que requiere la misma.

#### **2.3.3. Ensayo de Abrasión**

Se encarga en determinar el desgaste de las mezclas asfálticas a través de la máquina de Los Ángeles, este procedimiento permite valorar de forma empírica la resistencia a la disgregación, producto de una falta de existencia de cohesión de la mezcla para poder resistir la acción abrasiva del tránsito de forma apropiada (INVE E-760, 2012).

### **2.4. Trabajo en laboratorio**

A continuación, se describe la metodología a seguir para la realización de los diferentes ensayos, con el objetivo de determinar las propiedades de cada material y verificar el cumplimiento de las mismas.

#### **2.4.1. Origen de los agregados utilizados**

Los agregados usados en la fabricación de las mezclas asfálticas se obtuvieron a través de ASFALTAR EP que es una empresa Pública del Gobierno Provincial



del Azuay, encargada de la producción y comercialización de áridos y hormigón asfáltico, mismo que cumplen con los estándares mínimos de calidad.

La empresa hace uso de dos canteras para la producción de agregado; la primera se encuentra ubicado en Ayancay en la comunidad de Zumbahuayco a  $2^{\circ}49'38.1''S$   $78^{\circ}53'18.8''W$  como se muestra en la Figura 7, de esta mina se obtuvo la arena de río como árido fino.

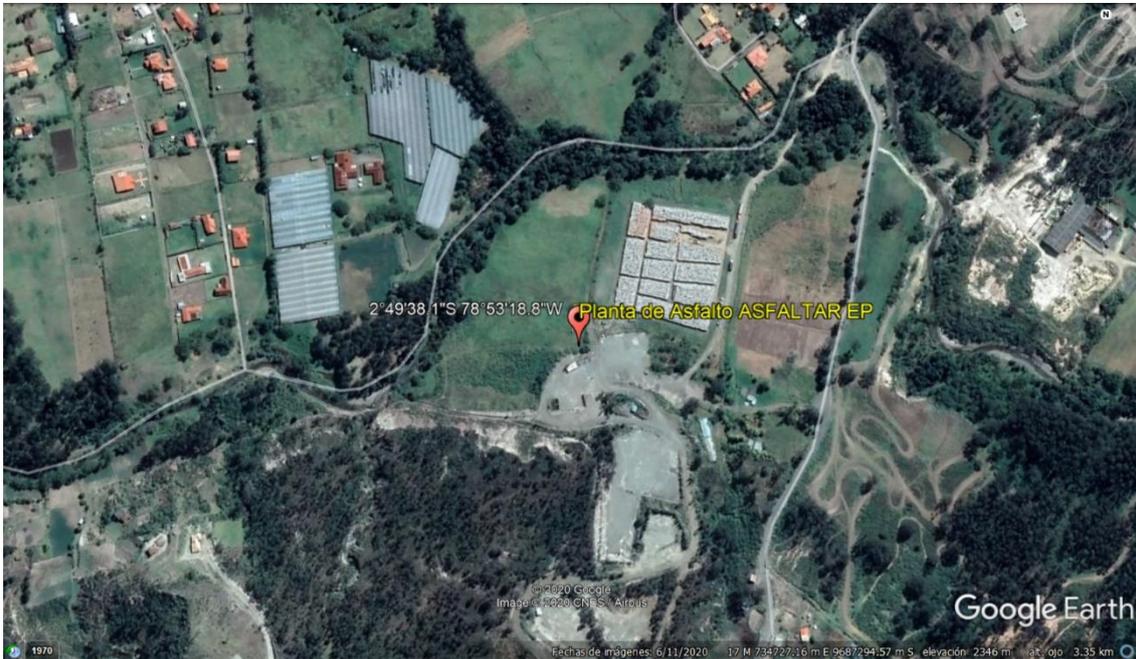


Figura 7. Ubicación Geográfica de la mina de Ayancay de la Planta de Asfalto.

Fuente: Fotografía digital sacada de Google Earth.

La segunda mina se ubica en Guachapala a  $2^{\circ}45'51.1''S$   $78^{\circ}44'3.042''W$  como se muestra en las Figura 8 y Figura 9, esta es la Planta Trituradora de ASFALTAR “La Virginia” y de aquí se obtuvo el árido grueso ( $5/8''$ ,  $3/8''$  y  $3/16''$ ).

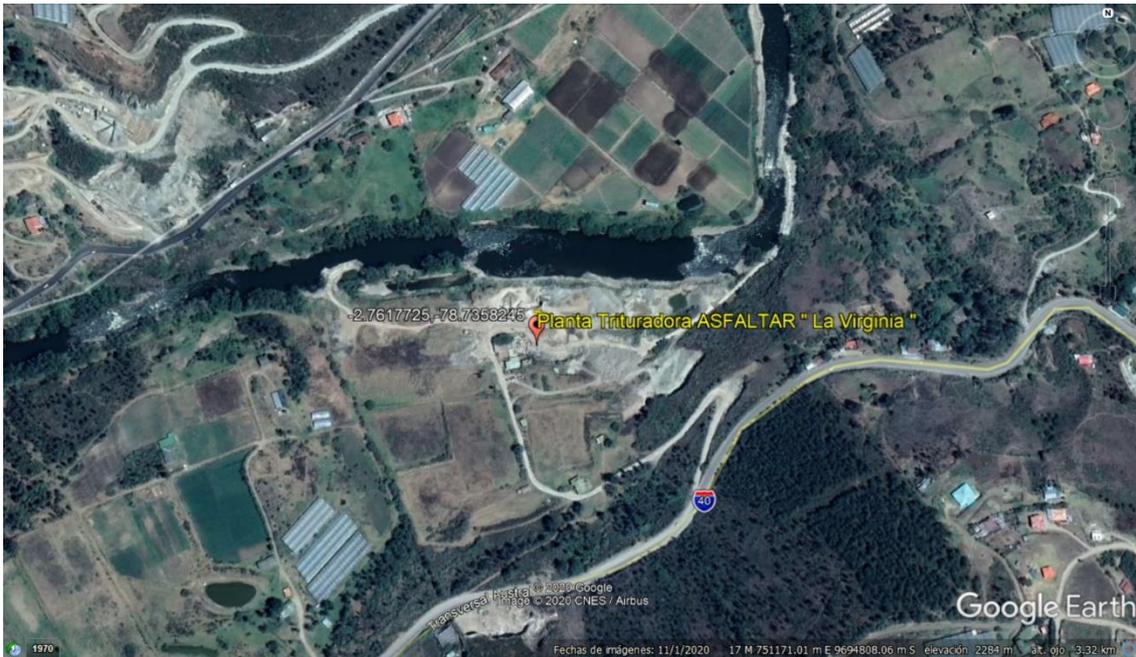


Figura 8. Ubicación Geográfica de la mina "La Virginia" Planta trituradora.  
Fuente: Fotografía digital sacada de Google Earth.



Figura 9. Entrada a la mina Guachapala - "La Virginia".  
Fuente: Fotografía digital sacada de Google Earth.

La Figura 10 muestra el momento de la obtención de los diferentes materiales utilizados dentro del presente trabajo de titulación, mismos que fueron proporcionados por la empresa ASFALTAR EP.



Figura 10. Extracción del material de las diferentes minas.

#### 2.4.2. Origen del cemento asfáltico

El cemento asfáltico usado también fue proporcionado por ASFALTAR EP; esta empresa obtiene el asfalto a través de los procesos de refinación del crudo que se llevan a cabo en la refinería de Esmeraldas.

El asfalto cumple con todas las especificaciones técnicas de la INEN 2515, 2014 mostradas en el apartado 2.1.2. Cemento Asfáltico.

#### 2.4.3. Ensayos en Áridos

##### 2.4.3.1. Ensayo de Granulometría

A continuación, se describe el procedimiento seguido en el ensayo, tomando como guía las especificaciones técnicas ASTM C-136: “Métodos de Prueba Estándar para Análisis Granulométrico de Agregados Finos y Gruesos”.

- a. Muestrear por cuartos el material húmedo como se observa en la Figura 11, siguiendo la norma ASTM C702: “Práctica estándar para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba” y luego dejarlo en el horno durante 24 horas y a 115°C, para llevarla a estado seco.



Figura 11. Cuarteo del material.

- b. Sacar la muestra del horno y dejar enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.
- c. Seleccionar los juegos de tamices adecuados para el agregado fino y grueso (ver Figura 12), seguidamente colocarlos en la máquina tamizadora en orden de tamaño decreciente de acuerdo con su abertura.

Para la granulometría del agregado grueso se deberá colocar los tamices en orden decreciente, de acuerdo a la Tabla 6.

Tamiz	Abertura
1"	25.0 mm
3/4"	19.0 mm
1/2"	12.5 mm
3/8"	9.50 mm
#4	4.75 mm
Fondo	

Tabla 6. Abertura de Tamices del Agregado Grueso.



Figura 12. Análisis Granulométrico, Tamices gruesos.

- d. Tamizar el árido por la serie de tamices gruesos, durante 5 minutos y luego determinar la masa del material retenido por cada tamiz.
- e. Después, tomar una muestra representativa del material retenido en el fondo de la serie gruesa, lavarlo sobre el tamiz #200 y dejarlo secar durante 24 horas.
- f. Sacar la muestra del horno y dejar enfriar hasta que alcance la temperatura ambiente.
- g. Luego se procede a pesar y determinar el material que se ha perdido por el lavado.
- h. Tamizar el árido fino durante 5 minutos, utilizar la serie de tamices finos, en orden decreciente como se muestra en la Tabla 7 y Figura 13.

Tamiz	Abertura
#4	4.75 mm
#8	2.38 mm
#10	2.00 mm
#16	1.19 mm
#30	0.59 mm
#40	0.42 mm
#50	0.297 mm
#100	0.149 mm
#200	0.074 mm
Fondo	

Tabla 7. Abertura de Tamices del Agregado Fino.



Figura 13. Análisis Granulométrico, Tamices finos.

- i. Luego pesar el material retenido por cada tamiz y finalmente graficar la curva granulométrica (% pasa vs mm de tamiz) de los áridos.

#### 2.4.3.2. Ensayo de Abrasión

El ensayo se realizó según la especificación propuesta en la norma ASTM C131: “Método estándar de prueba para determinar la resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles”.

A continuación, se describe el procedimiento seguido para realizar el ensayo de abrasión.

- a. Preparar la muestra bajo la norma ASTM C702: “*Práctica estándar para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba*”, así como se ilustra en la Figura 14.



Figura 14. Material a usar para el ensayo de abrasión.

- b. Tamizar el material seco (agregado grueso) para trabajar únicamente con lo retenido en el tamiz #4 y con lo que pasa el tamiz 1”. En la Figura 15 se observa como el material es colocado en la serie de tamices gruesos, para su posterior ejecución.



Figura 15. Tamizado del agregado grueso.

- c. Utilizar  $1250 \pm 25$  g de material retenido en cada uno de los tamices  $3/4$ ”,  $1/2$ ”,  $3/8$ ”, #4 trabajando así con  $5000 \pm 10$  g en total, como se ilustra en la Figura 16.



Figura 16. Material a ensayar.

- d. Seguidamente, colocar el material en la máquina de Los Ángeles, junto con las esferas metálicas, tal como se ilustra en la Figura 17 y luego encender el equipo.



Figura 17. Esferas colocadas dentro de la máquina de Los Ángeles.

- e. Finalizado el proceso de abrasión, se tamiza todo el material por el tamiz #12, y se procede a determinar la masa luego del proceso de abrasión.
- f. Lavar el material para obtener una mayor precisión; así se eliminará la mayoría de partículas finas.
- g. Dejar a secar el material lavado en el horno por un periodo de aproximadamente 24 horas a una temperatura constante de 110 °C.
- h. Finalmente, pesar y registrar el material ya limpio de partículas finas como masa final.

#### 2.4.3.3. Ensayo de densidades

El ensayo se desarrolló siguiendo las normativas de la ASTM C-127: “Método estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica), y absorción para árido grueso” y ASTM C-128: “Método estándar para gravedad específica y absorción para agregado fino”.

A continuación, se describe el proceso seguido para determinar las densidades de los agregados fino y grueso a través del procedimiento gravimétrico.

- a. Realizar el muestreo del árido por el método de cuarteo, para obtener una muestra representativa del material a través de la norma ASTM C702: *“Práctica estándar para reducir muestras de agregados al tamaño de prueba”*.
- b. Retirar de la muestra el material que pasa el tamiz #4 y seleccionar la muestra mínima para el ensayo en función del tamaño máximo nominal del agregado.
- c. Secar la muestra en el horno a la temperatura de 110°C para conseguir una masa constante, luego dejar a temperatura ambiente para que se enfríe.
- d. Sumergir en su totalidad el árido grueso y fino en agua durante 24 horas, así como se muestra en la Figura 18 y Figura 19.



Figura 18. Material grueso sumergido en agua.



Figura 19. Material fino sumergido en agua.

- e. Una vez saturado el material decantar el exceso de agua, extraer la muestra sobre una superficie plana no absorbente y moverla frecuentemente para asegurar un secado homogéneo. Con ayuda de una franela retirar el agua superficial para obtener la condición saturada superficialmente seca (SSS) y registrar el peso de esta masa. La Figura 20 y Figura 21 muestran las condiciones en SSS de los áridos fino y grueso, respectivamente.



Figura 20. Condición SSS del árido fino.



Figura 21. Condición SSS del agregado grueso.

- f. Llenar parcialmente el picnómetro con agua e introducir  $500 \pm 10$  g de árido saturado superficialmente seco y adicionar agua hasta el 90% de su capacidad.
- g. Agitar manualmente el picnómetro para eliminar las burbujas de aire existentes, ajustar la temperatura del picnómetro y su contenido a  $23^{\circ}\text{C}$  y llevar el nivel de agua hasta la marca de calibración.
- h. Registrar la masa total del picnómetro + muestra + agua, así como se observa en la Figura 22.



Figura 22. Peso del picnómetro más agua y muestra.

- i. Cuidadosamente retirar el árido del picnómetro, secarlo a una temperatura de 100°C, hasta obtener una masa constante y finalmente determinar la masa seca.

#### 2.4.4. Ensayos en el Vidrio

##### 2.4.4.1. Obtención del vidrio triturado

A continuación, se da a conocer el proceso llevado a cabo en laboratorio para la obtención del vidrio triturado.

- a. El reciclaje comenzó con la recolección de 80 botellas de vidrio de diferente tamaño, pudiendo ser botellas de gaseosas, cerveza, jugos, bebidas hidratantes entre otros.

En la Figura 23 se observan las botellas de cerveza recolectadas de diferente tamaño.



Figura 23. Recolección de botellas.

- b. Como se observa en la Figura 24 estos envases fueron lavados manualmente para poder retirar las etiquetas existentes y luego

dejadas al sol durante 1 día para que todo su contenido se encuentre seco.



Figura 24. Lavado y secado de botellas.

- c. Previo a la obtención del vidrio triturado, las botellas fueron rotas manualmente, así como se observa en la Figura 25. Se colocan alrededor de 10 botellas dentro de un costal para ser rotas mediante golpes con combos, hasta obtener un tamaño más pequeño de partículas, con el objetivo de que sea más trabajable dentro de la máquina de Los Ángeles. Este procedimiento se repitió con todas las botellas.



Figura 25. Trituración manual de las botellas.

- d. Los trozos de vidrios obtenidos anteriormente fueron colocados dentro de la máquina de Los Ángeles conjuntamente con las 12 esferas de acero para su posterior trituración.



*Figura 26. Colocación del material dentro de la Máquina de los Ángeles.*

- e. Finalmente, se saca todo el material colocado dentro de la máquina de Los Ángeles (ver Figura 26) y se procede a pasarlo por el tamiz 3/8", para luego ser almacenado para su posterior uso. En la Figura 27 y Figura 28 se aprecia el vidrio triturado luego de haber sido sacado de la máquina de Los Ángeles.



*Figura 27. Vidrio triturado tamizado.*



*Figura 28. Vidrio triturado.*

#### 2.4.4.2. Ensayo de granulometría en el vidrio

El ensayo se desarrolló siguiendo la misma normativa ASTM C-136: “Métodos de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos” propuesto en el numeral 2.4.3.1. Ensayo de Granulometría.

Previo a la utilización del vidrio se realizó el cuarteo del material tal como se aprecia en la Figura 29. Además, cabe destacar que para el desarrollo de este ensayo se va a utilizar el vidrio con un tamaño máximo nominal de 4.75 mm, así como se aprecia en la Figura 30.



Figura 29. Cuarteo del material: vidrio.



Figura 30. Tamaño máximo nominal 4.75 mm.

#### 2.4.4.3. Ensayo de densidad en el vidrio

De igual manera para realizar el ensayo para la densidad del vidrio se siguió la norma ASTM C-128: “Método estándar para gravedad específica y absorción para agregado fino” propuesta en el numeral 2.4.3.3. Ensayo de densidades.

En la Figura 31 se observa 3 bandejas con vidrio, las cuales se encuentran sumergidas totalmente en agua para luego ser ensayadas.



Figura 31. Muestras de vidrio saturadas de agua.

#### 2.4.5. Ensayos en Mezclas Asfálticas

##### 2.4.5.1. Elaboración de las briquetas

En laboratorio el procedimiento seguido para elaborar las briquetas convencionales no difiere de las briquetas modificadas con vidrio triturado, por lo que a continuación se describe todo el proceso para elaborar las briquetas.

- Luego de calculados los pesos necesarios para obtener la granulometría deseada en la combinación de áridos, pesar inicialmente 1200 g. para el peso total de la briqueta.
- Calentar los áridos (grueso, fino y vidrio) en la cocina, tal como se muestra en la Figura 32, a una temperatura de 175 a 190°C.



Figura 32. Áridos calientes a temperatura de 179°C.

- c. Calentar el betún asfáltico a una temperatura de 120 a 137°C agitando frecuentemente para evitar algún sobrecalentamiento local. No se recomienda utilizar un asfalto recalentado.



Figura 33. Betún asfáltico calentado en la cocina.

- d. Mezclar los áridos, así como se aprecia en la Figura 34, de tal manera que se forme un cráter en el centro para introducir la cantidad de asfalto necesaria con cada combinación y seguidamente mezclar los áridos y el asfalto hasta obtener una distribución uniforme.

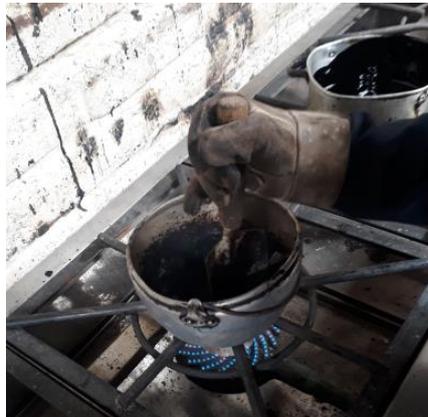


Figura 34. Mezcla asfáltica preparada.

- e. Para compactar la muestra ya preparada, esta no deberá estar a una temperatura inferior a 107°C, en el caso de que no se encuentre a esa temperatura se deberá preparar una mezcla nueva.
- f. Los moldes de compactación deben estar limpios y se procede a calentar a una temperatura entre 95 a 150°C. Para calentar el martillo se sugiere hacerlo con agua hirviendo.
- g. Cuando el molde haya alcanzado la temperatura necesaria colocarlo sobre el dispositivo de ajuste y en el fondo del molde depositar un disco de papel filtro de 4" de diámetro. Seguidamente introducir aproximadamente 1200 g de mezcla caliente con ayuda de una cuchareta, así como se indica en la Figura 35.



Figura 35. Introducción de la mezcla asfáltica en el molde.

- h. Con ayuda del martillo compactador aplicar el número necesario de golpes dependiendo del nivel de tránsito para el cual se está diseñando (Figura 36).

La Tabla 8 describe los criterios del diseño Marshall propuestos por el Asphalt Institute, en donde el número de golpes a aplicarse va de acuerdo al tipo de tráfico. Puesto que la presente investigación está enfocada para el diseño de un tráfico mediano, se deberá compactar la mezcla asfáltica con 50 golpes.

Método Marshall	Tráfico ligero		Tráfico medio		Tráfico pesado	
	Carpeta y base		Carpeta y base		Carpeta y base	
Criterio de mezcla	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
Compactación, número de golpes en cada uno de los especímenes	35		50		75	
Estabilidad (lb)	750	-----	1200	-----	1800	-----
Flujo (0.01 in)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de vacíos en los agregados minerales	Ver Tabla 2.5					
Porcentaje de vacíos rellenos de asfalto	70	80	65	78	65	75

Tabla 8. Número de golpes correspondientes a los diferentes volúmenes de tráfico.  
Fuente: (Asphalt Institute, 2014).



Figura 36. Compactación de las briquetas.

- i. Retirar el collar de extensión del molde e invertir la posición de la base del molde y el collar de extensión, luego continuar aplicando el mismo número de golpes con el martillo compactador.
- j. Luego de terminada la compactación, retirar el molde del dispositivo de ajuste y colocarlo en un recipiente con agua fría durante 3 minutos.
- k. Finalmente, retirar el molde del agua y con ayuda de una gata extraer la briqueta. Repetir este proceso para la ejecución de las demás briquetas.

Como se observa en la Figura 37 las briquetas ya están elaboradas, mismas que deben ser identificadas y posteriormente serán ensayadas en el equipo Marshall.



Figura 37. Briquetas elaboradas.

#### 2.4.5.2. Ensayo Marshall

A través de la norma ASTM D2726: “*Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non - Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*”, se determinó el peso específico de las mezclas asfálticas compactadas.

- a. Pesar cada briqueta en aire y registrar dicho valor como peso en seco (Figura 38). De preferencia utilizar una balanza con precisión de 0.01 g.



Figura 38. Peso seco en aire de la briqueta.

- b. Sumergir la muestra en un baño a 25°C durante  $4 \pm 1$  minutos y luego determinar la masa en agua. Como se observa en la Figura 39 la briqueta está dentro de la canastilla sumergida totalmente en agua.



Figura 39. Briqueta sumergida en agua a 25°C.

- c. Secar rápidamente la superficie de la briqueta, pesarla nuevamente en aire y registrar su valor, así como se observa en la Figura 40.



Figura 40. Briqueta pesada en aire luego de haber sido sumergida.

- d. Repetir dicho proceso para las demás briquetas.

El procedimiento para determinar la estabilidad y flujo siguiendo la norma ASTM D6927: “Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures” es el siguiente:

- a. Colocar las briquetas dentro de un baño de agua, manteniendo la temperatura a 60°C durante 30 o 40 min. Como se observa en la Figura 41 las briquetas están colocadas dentro del equipo asegurándose de que el agua las cubra completamente.



Figura 41. Briquetas colocadas a baño María.

- b. Retirar una briqueta y colocarla en el centro de la mordaza inferior y luego colocar la mordaza superior. Cuidadosamente, situarla en el centro de la prensa y colocar el deformímetro de tal manera como se indica en la Figura 42.



Figura 42. Ejecución del ensayo Marshall.

- c. Ajustar a cero el dial de carga de la prensa y el deformímetro, luego aplicar la carga tomando en cuenta que la deformación sea constante a 50.8 mm por minuto hasta que se produzca la falla.
- d. Registrar la lectura del dial de carga máxima y la lectura del dial del deformímetro en el instante que alcanzó dicha carga. El valor que se registre como estabilidad será el resultado de haber multiplicado el valor de carga máxima por la constante del anillo.

En la Figura 43 se presentan las briquetas luego de haber sido ensayadas en el equipo Marshall.



Figura 43. Briquetas luego del ensayo.

- e. En el caso de que el espesor de la probeta sea diferente de 63.5 mm, se deberá corregir la estabilidad Marshall multiplicándole por un factor de corrección, mismo que se encuentra en los anexos de la norma.
- f. Repetir este proceso para las demás briquetas.

### 2.4.5.3. Ensayo RICE

A través de la normativa ASTM D 2041 – 00: “Método de prueba estándar para la densidad y la gravedad específica máxima teórica de las mezclas asfálticas”, se describe el proceso seguido en laboratorio para la ejecución de dicho ensayo.

- a. Mediante el método de pesar en aire, calibrar la taza de vacío haciendo la corrección por temperatura, para lo cual se debe determinar la masa de cada uno cuando el frasco esté lleno de agua a intervalos de temperaturas y graficar la curva masa versus temperatura.
- b. Preparar la mezcla asfáltica de ligante bituminoso y agregado, utilizando una muestra mínima según el tamaño máximo de agregado, descrito en la Tabla 9.

Tamaño de la partícula de mayor tamaño en la muestra mm (pulg)	Muestra mínima gr.
50.0 (2)	6000.00
37.5 (1 ½)	4000.00
25.0 (1)	2500.00
19.0 (¾)	2000.00
12.5 (½)	1500.00
9.5(3/8)	1000.00
4.75 (#4)	500.00

Tabla 9. Muestra mínima para el ensayo RICE.  
Fuente: (ASTM D2041, 2019).

- c. Manualmente, separar las partículas de la mezcla, evitando fracturar las partículas de minerales y dejar enfriar hasta la temperatura ambiente.
- d. Colocar la muestra directamente en el recipiente de vacío como indica la Figura 44, pesarla y luego colocarla en el dispositivo mecánico agitador.



Figura 44. Muestra colocada en el recipiente de vacíos.

- e. Cubrir completamente el recipiente de vacío con suficiente agua a temperatura de 25°C y cerrar el dispositivo, así como se observa en la Figura 45 y Figura 46. Seguidamente agitar continuamente el dispositivo mecánico y remover el aire atrapado con incrementos graduales de vacíos hasta alcanzar la presión de  $3.7 \pm 0.3$  kPa y mantener dicha presión durante 15 minutos.



Figura 45. Máquina de agitador.



Figura 46. Equipo RICE

- f. Retirar cuidadosamente el recipiente con la tapa puesta tratando de evitar la inclusión de aire, medir la temperatura y determinar la masa del recipiente con el contenido.

La Figura 47 muestra el momento de la toma de la temperatura del agua luego de haber sido realizado el ensayo, en la cual el agua se encuentra a 25°C para, posteriormente, determinar la masa de la misma, así como se visualiza en la Figura 48.



Figura 47. Temperatura del agua luego del ensayo.



Figura 48. Determinar la masa del recipiente con el contenido.

- g. Finalmente, repetir este procedimiento para las demás muestras.

#### 2.4.5.4. Ensayo de Adherencia

Este ensayo está basado en la norma ASTM D 3625 – 96: “*Práctica estándar para el efecto del agua en áridos con revestimiento bituminoso utilizando agua hirviendo*”, cuyo objetivo es determinar visualmente en las mezclas sueltas de agregados cubiertos con asfalto, la pérdida de adherencia.

A continuación, se describe el proceso seguido para estimar visualmente la pérdida de adhesión del asfalto al agregado.

- a. Preparar la mezcla de ligante bituminoso y agregado siguiendo el proceso para la elaboración de mezclas asfálticas
- b. En un recipiente calentar agua y esperar hasta la ebullición.
- c. Introducir 250 g de la mezcla de agregado cubierta con asfalto en el agua hirviendo, evitando retirar el recipiente de la fuente de calor y esperar que el agua hierva nuevamente y mantener esta condición por 10 minutos, así como lo muestra la Figura 49.



Figura 49. Mezcla de agregado cubierto con asfalto en agua hirviendo.

- d. Finalizado el lapso de 10 minutos, retirar el recipiente de la fuente de calor, decantar el exceso de agua y verter la muestra en una toalla, como se observa en la Figura 50.
- e. Finalmente observar las partículas de agregado grueso, fino y en este caso vidrio y estimar el porcentaje del área visible total en el agregado que retiene el cubrimiento original, para lo cual se clasifica como superior al 95% o inferior al 95%.



Figura 50. Muestra extendida en una toalla absorbente.

#### 2.4.5.5. Ensayo de Abrasión

A través de la norma INVE – 760 – 13: “*Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo de cántabro de pérdida por desgaste*” se describe el procedimiento seguido en laboratorio para caracterizar la mezcla asfáltica.

- a. Las briquetas a ser ensayadas siguen el mismo procedimiento descrito en el apartado 1.4.5.1.
- b. Determinar la masa de cada briqueta a ser ensayada y anotar dicho valor como P1 (ver Figura 51).



Figura 51. Peso de la briqueta (P1) antes del ensayo.

- c. Introducir la briqueta en la máquina de Los Ángeles sin la carga abrasiva proporcionada por las esferas. Seguidamente, iniciar el ensayo haciendo que el tambor gire durante 300 revoluciones y a una velocidad de 188 a 208 rad/min.
- d. Finalmente, sacar la briqueta, determinar nuevamente su masa, como lo indica la Figura 52 y anotar dicho valor como P2.



Figura 52. Peso de la briqueta (P2) luego del ensayo.



## CAPITULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

---

En este capítulo se presentan los resultados de todos los ensayos realizados para diseñar una mezcla asfáltica convencional y la alternativa adicionando vidrio triturado con diferentes porcentajes.

Los resultados del ensayo Marshall que se presentan en esta sección están escalados, debido a que existió un problema con el equipo Marshall de la Universidad de Cuenca, dichos resultados reales se presentan en la sección del Anexo 1 al Anexo 5.

### **3.1. Resultados de la caracterización de los materiales**

Previo a realizar la dosificación de las mezclas asfálticas, es necesario conocer las características de granulometría, gravedad específica y porcentaje de absorción de los áridos con los cuales se está trabajando.

#### **3.1.1. Caracterización de los áridos**

##### **3.1.1.1. Análisis granulométrico**

Para el análisis granulométrico de los diferentes áridos se ha calculado la media ponderada de los mismos, para luego obtener sus respectivas curvas granulométricas. El detalle del análisis de cada granulometría se encuentra en la sección de Anexos.

En los siguientes ítems (a, b, c y d), se muestra el resumen de los resultados obtenidos luego de haber realizado los 5 análisis granulométricos de los áridos 3/8", 5/8", 3/16" y arena, donde el tamaño máximo del agregado es de 3/4".

Para fines prácticos a los áridos 3/8", 5/8", 3/16" y arena; los denominaremos árido A, B, C, D respectivamente.

#### **a. Granulometría del árido A (árido 3/8")**

En el Anexo 6 al Anexo 10, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido; esto se visualiza en la Tabla 10; en donde el tamaño máximo de dicho agregado es 1/2" y el tamiz #4 tiene el mayor porcentaje retenido con un 88.5%.

En la Figura 53 se observa la curva granulométrica ponderada para el árido A.



Granulometría árido A - (Árido 3/8")						
Muestra:	A - Nro. 1	A - Nro. 2	A - Nro. 3	A - Nro. 4	A - Nro. 5	A - Promedio
Tamiz	% Pasa					
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
1/2"	99.96	99.97	99.97	99.95	99.95	<b>99.96</b>
3/8"	99.88	99.84	99.87	99.82	99.78	<b>99.84</b>
#4	10.69	11.57	12.70	12.07	10.52	<b>11.50</b>
#8	1.08	1.96	2.90	1.58	1.38	<b>1.78</b>
#10	0.67	1.16	1.95	1.24	0.95	<b>1.19</b>
#16	0.24	0.53	1.12	0.66	0.38	<b>0.58</b>
#30	0.06	0.18	0.24	0.23	0.10	<b>0.16</b>
#40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
#50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
#100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>
#200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>

Tabla 10. Análisis granulométrico del árido A.

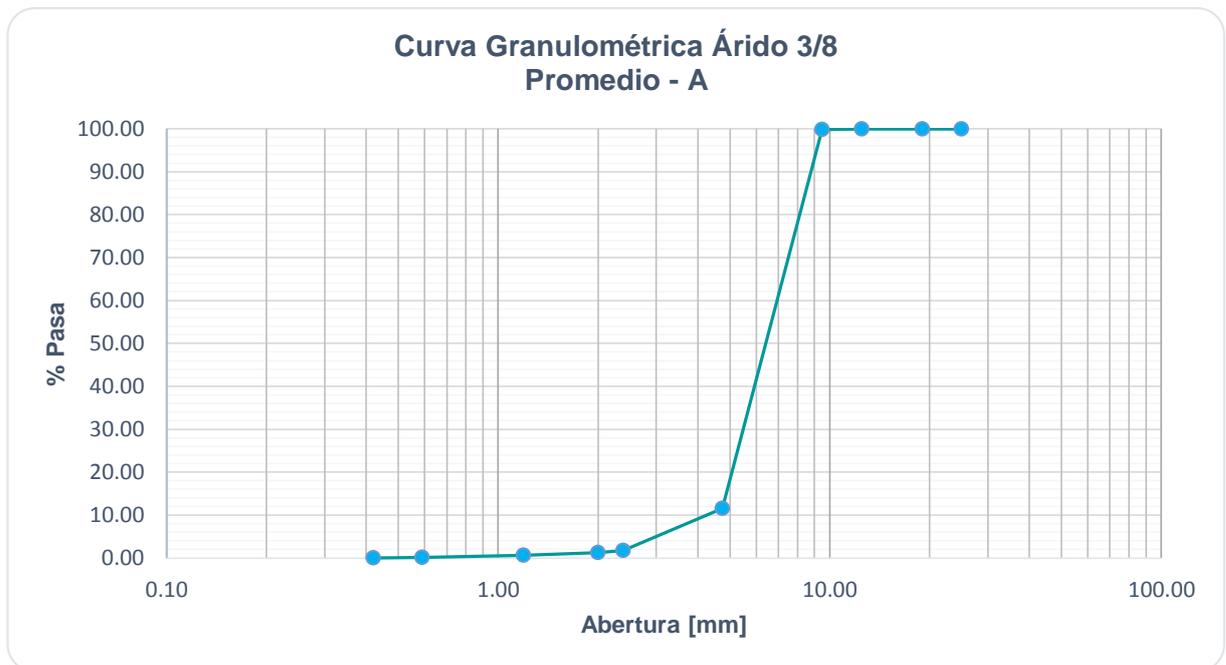


Figura 53. Curva granulométrica del árido A, 3/8".

**b. Granulometría del árido B (árido 5/8")**

En el Anexo 11 al Anexo 15, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido. Luego de realizada la media aritmética del árido B, tal como se muestra en los resultados en la Tabla 11, se tiene un tamaño máximo de agregado de 3/4". De acuerdo a la Figura 54 se observa que la curva granulométrica del árido está compuesta en su totalidad por partículas gruesas.



Granulometría árido B (Árido 5/8)						
Muestra	B - Nro. 1	B - Nro. 2	B - Nro. 3	B - Nro. 4	B - Nro. 5	B - Promedio
Tamiz	% Pasa					
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
3/4"	99.62	99.81	99.81	99.81	99.84	<b>99.74</b>
1/2"	49.29	49.31	49.31	59.88	51.22	<b>52.00</b>
3/8"	27.78	27.83	27.83	32.95	26.02	<b>28.85</b>
#4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>

Tabla 11. Análisis Granulométrico del árido B.

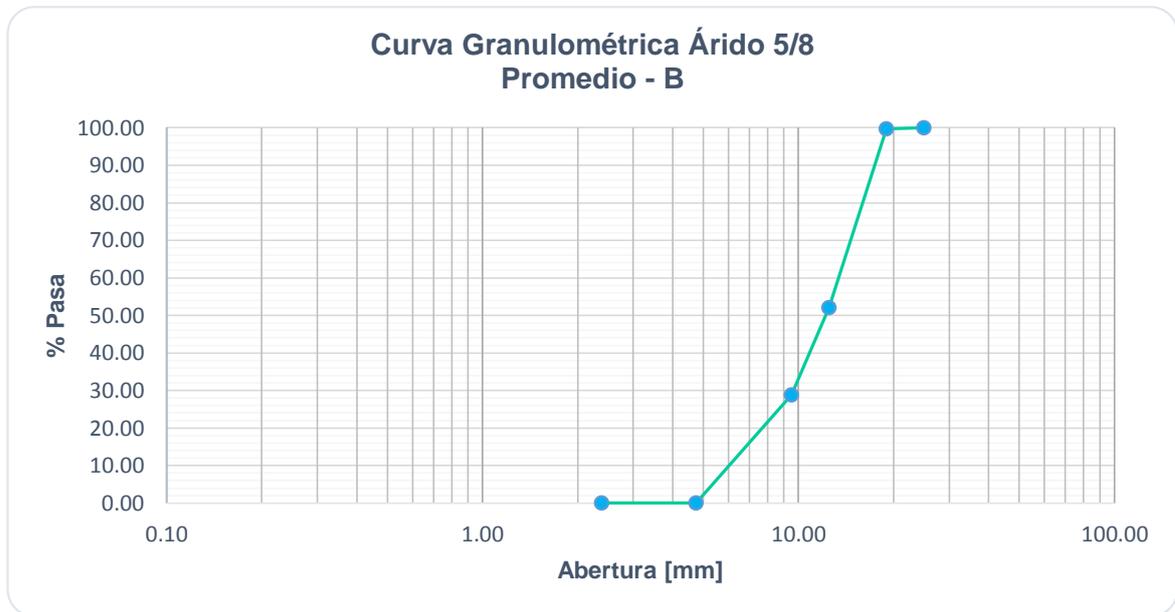


Figura 54. Curva granulométrica del árido B, 5/8".

### c. Granulometría del árido C (árido 3/16")

En el Anexo 16 al Anexo 20, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido.

El árido C tiene la característica de estar compuesto principalmente por partículas finas, así como se observa en la Figura 55, en donde el tamaño máximo de dicho agregado es 4.75 mm. De acuerdo con la Tabla 12, la cual representa los resultados de la media ponderada, identificamos que el tamiz #4 retiene tan solo un 3.41% del material y el tamiz #200 deja pasar un 7%.



Granulometría árido C (Árido 3/16)						
Muestra	C - Nro. 1	C - Nro. 2	C - Nro. 3	C - Nro. 4	C - Nro. 5	C - Promedio
Tamiz	% Pasa					
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#4	95.72	95.93	98.40	98.49	94.42	96.59
#8	66.18	63.10	65.66	67.21	65.04	65.44
#10	59.22	56.80	58.33	58.68	57.03	58.01
#16	39.87	39.88	41.03	39.49	39.71	40.00
#30	36.31	34.21	34.78	35.29	34.40	35.00
#40	26.96	22.86	23.75	25.60	25.85	25.00
#50	22.68	19.14	19.99	21.14	22.07	21.00
#100	17.24	14.68	15.48	16.08	16.50	16.00
#200	7.95	6.46	6.67	6.36	7.58	7.00
Fondo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 12. Análisis granulométrico del árido C.

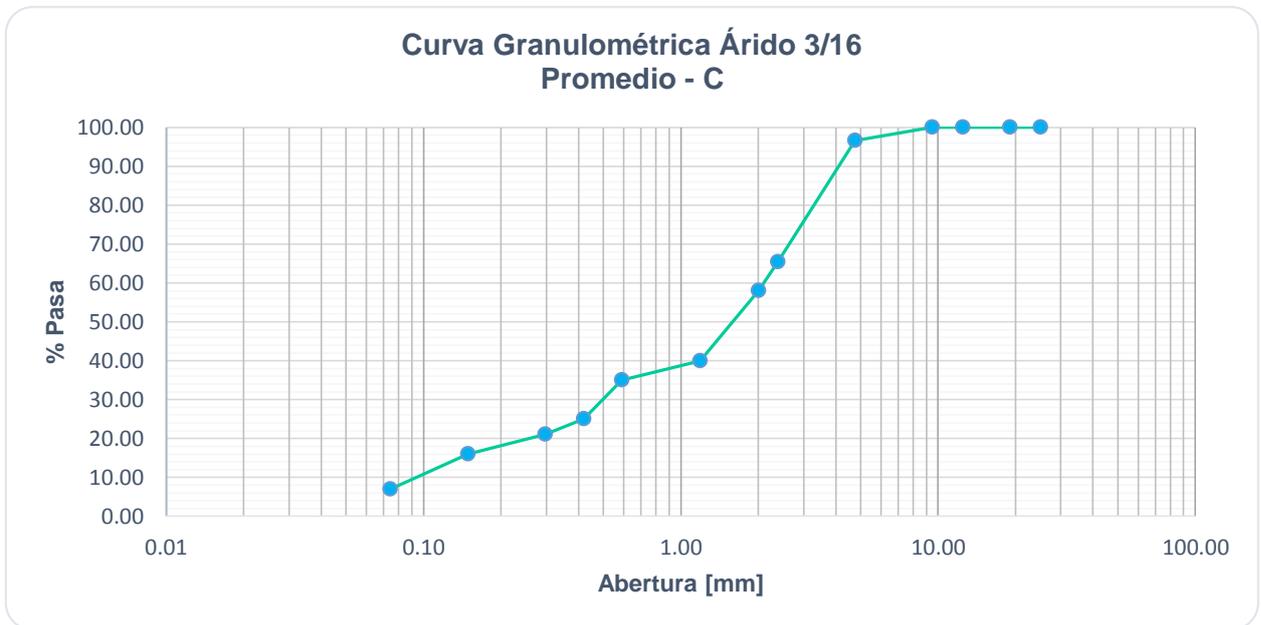


Figura 55. Curva granulométrica del árido C, 3/16".

**d. Granulometría del árido D (árido arena)**

En el Anexo 21 al Anexo 25, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido.



De igual forma, luego de haber calculado, la media ponderada del árido D, tal como se presenta en la Tabla 13, este se considera como un árido fino puesto que el tamaño máximo es de 4.75 mm. Observando la Figura 56, el tamiz #8 es el que mayor porcentaje de árido deja pasar con un 85.46%. En cambio, el tamiz #200 solo deja pasar en promedio un 10%.

Granulometría árido D (Árido Arena)						
Muestra	D - Nro. 1	D - Nro. 2	D - Nro. 3	D - Nro. 4	D - Nro. 5	D - Promedio
Tamiz	% Pasa					
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
3/8"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>
#4	87.14	86.91	85.61	83.57	84.05	<b>85.46</b>
#8	68.43	67.61	67.19	66.26	64.96	<b>66.89</b>
#10	63.70	62.74	62.78	61.55	60.09	<b>62.17</b>
#16	53.84	53.96	49.68	49.55	47.95	<b>51.00</b>
#30	33.12	32.32	29.63	28.15	26.78	<b>30.00</b>
#40	28.02	26.56	23.93	23.53	22.96	<b>25.00</b>
#50	24.00	22.50	21.11	21.15	21.23	<b>22.00</b>
#100	17.98	16.83	14.90	15.02	15.26	<b>16.00</b>
#200	11.77	10.44	9.07	9.08	9.65	<b>10.00</b>
Fondo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.00</b>

Tabla 13. Análisis granulométrico del árido D.

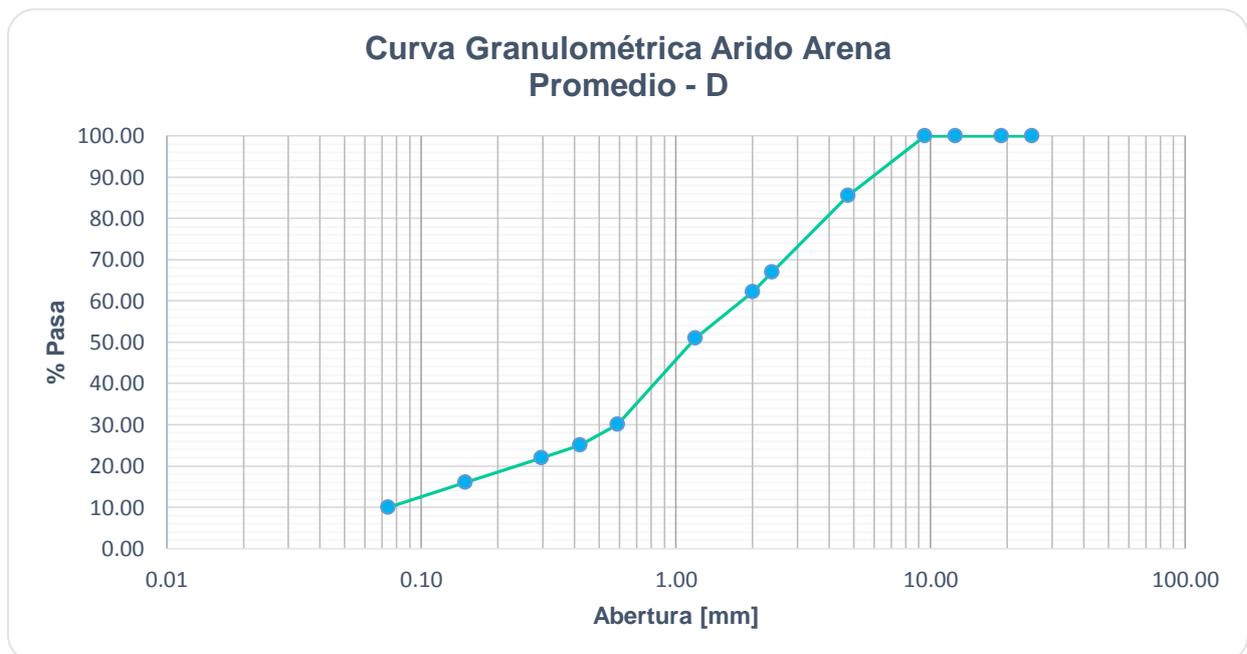


Figura 56. Curva granulométrica del árido D, Arena.



### 3.1.1.2. Ensayo de abrasión en el agregado grueso

De acuerdo a lo estipulado en la Tabla 2, que expone los requisitos del agregado grueso para mezclas asfálticas que sigue la normativa NEVI-12, se deberá tener un desgaste máximo del 40%.

Observando los resultados en la Tabla 14 y resolviendo la Ecuación 9, el desgaste máximo del árido B (árido 5/8) es de 3.58%, con lo cual cumple con lo normado.

P1: Peso antes del ensayo [gr]	5000.00
P2: Peso después del ensayo [gr]	4821.00

Tabla 14. Resultados del ensayo de abrasión.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{P1 - P2}{P1} * 100\%$$

Ecuación 9.

$$\% \text{ Desgaste} = \frac{5000 - 4821}{5000} * 100\% = 3.58\%$$

### 3.1.1.3. Ensayo de absorción y peso específico

En los Anexo 26 al Anexo 29, se muestra el detalle de los datos y cálculos realizados para obtener la Tabla 15 que presenta el resumen de los resultados del ensayo de peso específico y absorción realizado a los diferentes áridos. Los requerimientos de absorción para agregados gruesos y finos se encuentran en la Tabla 405-5.1 y Tabla 405-5.2 respectivamente de la norma NEVI-12.

El árido D (arena) tiene una gravedad específica de 2.642 g/cm<sup>3</sup> y una absorción de 0.52%, el mismo que cumple con el valor máximo de absorción con 0.5% para agregados finos. El árido C (agregado 3/16) tiene una gravedad específica de 2.542 g/cm<sup>3</sup>, pero el valor de absorción se encuentra fuera de este rango, sin embargo, dicho valor se puede considerar según el tipo de diseño. Por otra, parte los agregados gruesos deben cumplir con una absorción del 1%, para lo cual los áridos A y B (agregado 3/8 y agregado 5/8) tienen una absorción del 0.97% y 0.85%, respectivamente.

Muestra			Árido A	Árido B	Árido C	Árido D
Nomenclatura	Descripción	Unidad	Valor	Valor	Valor	Valor
Gsb	Gravedad específica seca Bulk	g/cm <sup>3</sup>	2.867	2.860	2.542	2.642
Gsssb	Gravedad específica saturada	g/cm <sup>3</sup>	2.894	2.885	2.570	2.656
Gsa	Gravedad específica seca aparente	g/cm <sup>3</sup>	2.948	2.932	2.614	2.679
	Absorción	%	0.970	0.850	1.070	0.520

Tabla 15. Resultados del ensayo de peso específico y absorción.

### 3.1.2. Caracterización del cemento asfáltico

El betún asfáltico con el cual se trabajó durante toda esta investigación fue de tipo AC-20, el cual fue proporcionado por la empresa ASFALTA EP.



La Tabla 16 muestra el resultado de análisis del betún asfáltico utilizado, el cual ha sido ensayado a una temperatura de 23.6°C con una humedad relativa de 69.7%. En la sección Anexo 30, se adjunta el informe avalado por PETROECUADOR S.A.

Parámetro	Método	Resultado	Unidad	Especificaciones	
				Min	Max
Viscosidad Absoluta 140 °F (60 °C)	ASTM D2171_NTE INEN 810	167	Pa s	160	240
Viscosidad Cinemática 275 °F (135°C)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981	358	mm <sup>2</sup> /s	300	-
Penetración 77 °F (25 °C)	ASTM D5_NTE INEN 918	60	dmm	60	-
Punto de Inflamación	ASTM D92_NTE INEN 808	288	°C	232	-
Solubilidad en tricloroetileno	ASTM D2042_NTE INEN 915	99.9	%P	99	-
Residuo de Ensayos de Película Fina en Horno Rotatorio	N/A	NA	-	N/A	N/A
Viscosidad 60°C	ASTM D2171_NTE INEN 810	678	Pa s	-	800
Ductilidad 77°F (25 °c) 5cm/min	ASTM D113_NTE INEN 916	67	cm	50	-
Gravedad API a 60°F (15.6°C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	7	API	REPORTE	REPORTE
Densidad Relativa (15.6/15.6°C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	1.0217	-	REPORTE	REPORTE
Gravedad Específica 25/25°C	ASTM 70	1.01	-	REPORTE	REPORTE
Punto de Ablandamiento	ASTM D36	47	°C	-	-
Índice de Penetración	ASTM D5_NTE INEN 918	-0.8	-	-1.5	1
Cambio de Masa	ASTM D2872	-0.23	%P	-	1
API Observado:	13.436				
Temperatura Observada:	85.4 °C				

Tabla 16. Resultados del análisis del betún asfáltico.  
Fuente: PETROECUADOR.

### 3.1.3. Caracterización del vidrio

Al vidrio le denominaremos árido E para facilidad de manejo; en el Anexo 31 Anexo 35, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido.

La Tabla 17 muestra los resultados de la media ponderada luego de realizado el ensayo granulométrico y como se observa en la Figura 57 la franja granulométrica con que se va a trabajar debe estar dentro del rango propuesto por la norma AASHTO M318: “Standard Specification for Glass Cullet Use for Soil – Aggregate Base Course”.



Granulometría árido E (Árido Vidrio)							
Muestra	E - Nro. 1	E - Nro.2	E - Nro. 3	E - Nro. 4	E - Nro. 5	E - Promedio	Especificaciones
Tamiz	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	Min - Max
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	
1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	
3/8"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100
#4	94.00	93.67	99.05	94.62	94.20	<b>95.11</b>	70 - 100
#8	49.65	55.07	54.74	56.55	56.27	<b>54.46</b>	35 - 88
#10	42.85	48.60	48.86	50.10	50.00	<b>48.09</b>	
#16	27.43	33.36	32.87	34.60	34.82	<b>32.62</b>	15 - 45
#30	14.87	19.39	19.06	20.01	20.60	<b>18.78</b>	
#40	10.29	13.92	13.65	14.30	14.87	<b>13.41</b>	
#50	7.53	10.23	9.84	10.31	10.94	<b>9.77</b>	4 - 12
#100	2.76	3.99	3.52	3.94	4.31	<b>3.71</b>	
#200	0.33	0.45	0.89	0.43	0.43	<b>0.51</b>	0 - 5

Tabla 17. Análisis granulométrico del árido E.

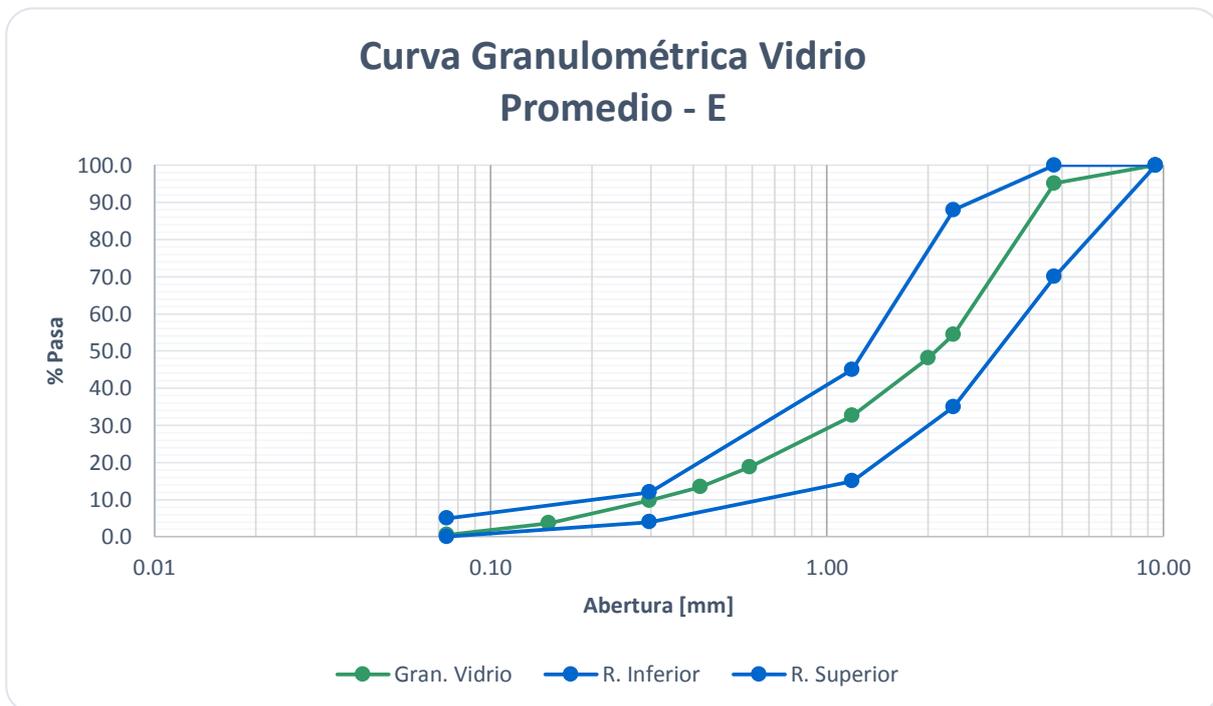


Figura 57. Curva granulométrica del árido E, Vidrio.

### 3.1.3.1. Gravedad específica y absorción del vidrio

En la sección Anexo 36, se encuentra el desarrollo a detalle del cálculo para obtener los resultados de gravedad específica y absorción. En la presente Tabla 18 se muestra un resumen de las gravedades específicas calculadas, en donde el vidrio triturado tiene una absorción de 8.44% y una gravedad específica seca de 1.98 g/cm<sup>3</sup>.



De acuerdo a lo estipulado en la Tabla 405-5.2 de la norma NEVI-12, el requerimiento de la absorción para un agregado fino debe ser de 0.5%. En este caso, el vidrio como agregado tiene una absorción de 8.44%, pero al no contar con una normativa dentro del país no es prudente colocarlo dentro de dicho rango.

Muestra			Árido E
Nomenclatura	Descripción	Unidad	Valor
Gsb	Gravedad específica seca Bulk	g/cm <sup>3</sup>	1.980
Gsssb	Gravedad específica saturada	g/cm <sup>3</sup>	2.148
Gsa	Gravedad específica seca aparente	g/cm <sup>3</sup>	2.378
	Absorción	%	8.44

Tabla 18. Resultados de peso específico y absorción del vidrio.

### 3.1.4. Caracterización de la cal hidratada

La cal hidratada por facilidad de manejo se la ha denominado árido F; en el Anexo 37 al Anexo 41, se muestran las cinco granulometrías realizadas al árido, en donde se toma de cada granulometría el porcentaje que pasa, para poder realizar una granulometría promedio que represente al árido.

La Figura 58 muestra el promedio de la curva granulométrica de la cal hidratada, a la cual se puede considerar de grano fino puesto que las partículas empiezan a retenerse desde el tamiz #50 (0.30 mm). El promedio del análisis granulométrico se muestra en la Tabla 19.

Además, tiene la característica de tener una gravedad específica seca de 2.211 g/cm<sup>3</sup>.

Granulometría árido F (Árido Cal Hidratada)						
Muestra	F - Nro. 1	F - Nro.2	F - Nro. 3	F - Nro. 4	F - Nro. 5	F - Promedio
Tamiz	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa
1"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/8"	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#4	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#8	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#10	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#16	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#30	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#40	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
#50	60.35	63.87	62.55	61.47	63.15	62.28
#100	23.80	24.36	23.61	25.91	25.80	24.70
#200	11.70	11.47	10.78	11.22	11.34	11.30
Fondo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 19. Análisis granulométrico de la cal hidratada.

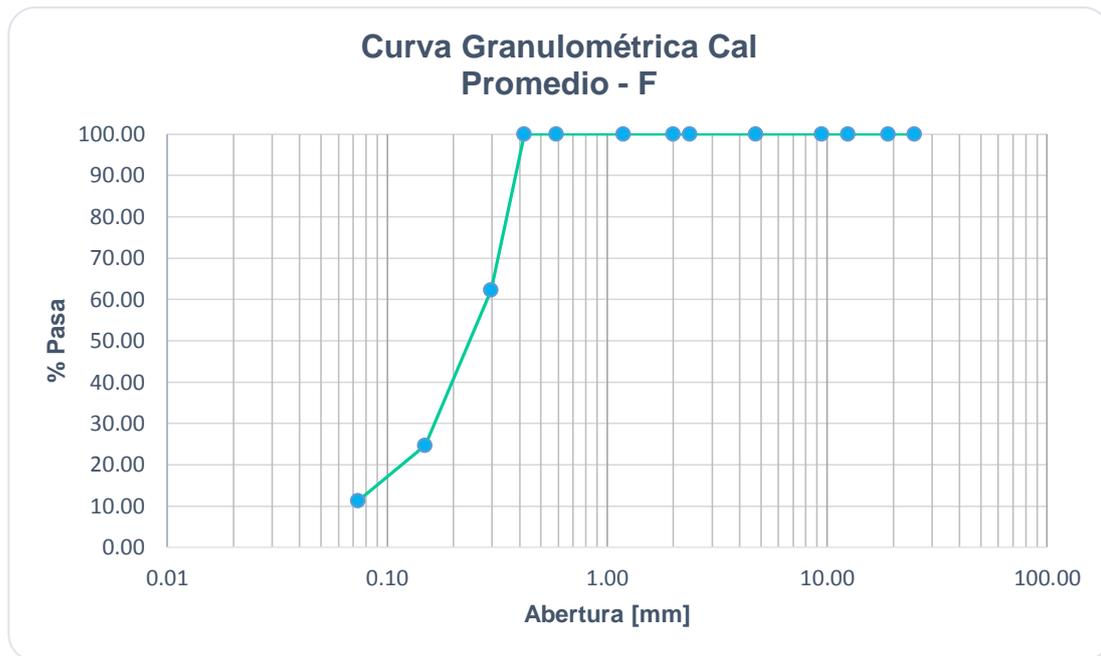


Figura 58. Curva granulométrica del árido F, Cal hidratada.

### 3.2. Análisis de la mezcla asfáltica convencional

#### 3.2.1. Dosificación de la mezcla convencional

Luego de realizados todos los ensayos de caracterización a los diferentes áridos que componen la mezcla asfáltica, se procedió a combinarlos a través del método de mínimos cuadrados y el método de Fuller, con el objetivo de trabajar con una franja granulométrica lo más cercana a la media propuesta por las especificaciones técnicas de la NEVI-12.

Los porcentajes de combinación de áridos que mejor se acercaron a la media de las especificaciones técnicas, resultaron de la combinación a través del método de Fuller. Por otra parte, el método de mínimos cuadrado arrojó porcentajes negativos, ocasionando efectos contraproducentes a la combinación.

Cumpliendo los requisitos de graduación para mezclas asfálticas densas mostradas en la Tabla 1 se seleccionó la graduación perteneciente al tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm, ya que los áridos cuentan con dicho tamaño máximo nominal.

A través del método de Fuller se logró una combinación eficaz, con un 8% del árido A (agregado 3/8), 40% del árido B (agregado 5/8), 11% del árido C (agregado 3/16), 40% del árido D (arena) y 1% del árido F (cal hidratada), como se indica en la Tabla 21, obteniéndose así una curva granulométrica combinada para la muestra patrón como se observa en la Figura 59.

En la Tabla 20 se observa numéricamente la granulometría combinada, donde se tiene cada uno de los tamices con sus respectivos porcentajes que pasan. El



detalle del cálculo completo de la combinación de áridos para la muestra convencional se encuentra en la sección Anexo 42 - Anexo 43.

MEZCLA CONVENCIONAL										
Tamiz	Tamiz mm	3/8"	5/8"	3/16"	ARENA	CAL	Granulometría Combinada % Pasa	Media	Especificaciones	
		Árido A % Pasa	Árido B % Pasa	Árido C % Pasa	Árido D % Pasa	Árido F % Pasa			Lim. Inferior	Lim. Superior
1"	25	100	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19	100	99.74	100.00	100.00	100.00	99.90	95.00	90.00	100.00
1/2"	12.5	99.96	52.00	100.00	100.00	100.00	80.80	76.00	67.00	85.00
3/8"	9.5	99.84	28.85	100.00	100.00	100.00	71.53	68.00	56.00	80.00
#4	4.75	11.5	0.00	96.59	85.46	100.00	46.73	50.00	35.00	65.00
#8	2.38	1.78	0.00	65.44	66.89	100.00	35.10	36.00	23.00	49.00
#10	2	1.19	0.00	58.01	62.17	100.00	32.34	32.50	20.00	45.00
#16	1.19	0.58	0.00	40.00	51.00	100.00	25.85	26.00	15.00	37.00
#30	0.59	0.16	0.00	35.00	30.00	100.00	16.86	17.00	8.00	26.00
#40	0.42	0.00	0.00	25.00	25.00	100.00	13.75	14.00	6.00	22.00
#50	0.297	0.00	0.00	21.00	22.00	62.28	11.73	12.00	5.00	19.00
#100	0.149	0.00	0.00	16.00	16.00	24.70	8.41	8.50	3.00	14.00
#200	0.074	0.00	0.00	7.00	10.00	11.30	4.88	5.00	2.00	8.00

Tabla 20. Dosificación de la muestra patrón.

% DE LA MEZCLA		
8.0	Árido A	3/8"
40.0	Árido B	5/8"
11.0	Árido C	3/16"
40.0	Árido D	ARENA
1.0	Árido F	CAL

Tabla 21. Porcentaje de combinación (Mezcla patrón).

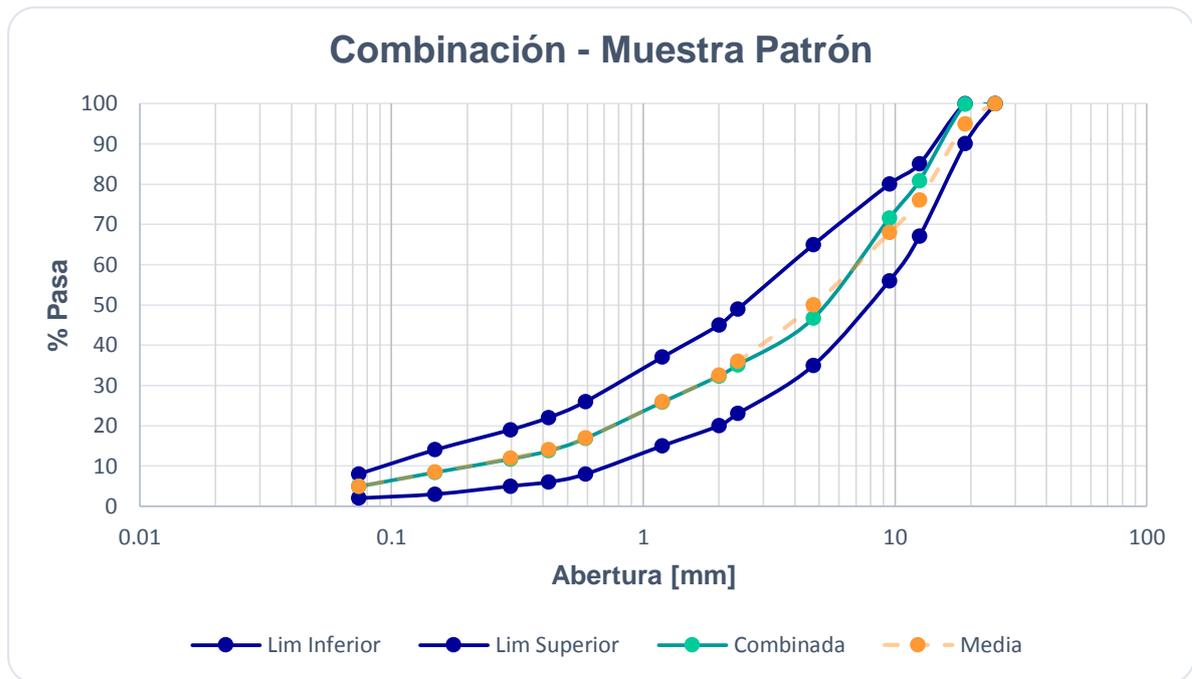


Figura 59. Combinación de la curva granulométrica de la muestra patrón.

### 3.2.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Se realizó el ensayo de la gravedad específica teórica máxima utilizando el 6% de asfalto, obteniéndose así un valor de  $G_{mm} = 2.457 \text{ g/cm}^3$ , como se indica en la Tabla 22.

Porcentaje de Asfalto	6.0%	
Porcentaje de vidrio	0% Vidrio	
A. Peso del Material [g.]	1500	1500
B. Peso Picnómetro + Agua [g.]	7253.5	7251.8
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [g.]	8131	8153
Peso Específico Máximo Muestra $G_{mm} \text{ [g/cm}^3\text{]}$	2.410	2.505
Promedio $G_{mm} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ $G_{mm} = \frac{A}{A + B - C}$	<b>2.457</b>	

Tabla 22. Cálculo de la gravedad específica máxima teórica.

### 3.2.3. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados

La Tabla 23 presenta los resultados luego de haber sido ensayadas las 15 briquetas elaboradas de forma convencional. Dentro del análisis es necesario calcular la gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ ) a través de la Ecuación 1, misma que hace uso de las gravedades específicas secas de cada agregado y con lo cual se obtuvo un valor de  $2.725 \text{ g/cm}^3$ .

Así mismo siguiendo la Ecuación 2, se calculó el valor de la gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ), la cual está en función del valor de la gravedad específica del betún ( $G_b = 1.010$ ), gravedad específica teórica máxima ( $G_{mm} = 2.457 \text{ g/cm}^3$ ) y el porcentaje de betún con el cual se desarrolló el ensayo RICE ( $\%P_b = 6\%$ ), dejando como resultado un valor de  $2.704 \text{ g/cm}^3$ . La Figura 60 muestra las 15 briquetas elaboradas con la mezcla asfáltica convencional, antes de ser ensayadas.



Figura 60. Briquetas patrón antes de ser ensayadas.

En la Figura 61 se observa el contenido de vacíos, misma que tiene una tendencia decreciente conforme aumenta el contenido de betún. Por otra parte, la gravedad específica sigue una tendencia cóncava, así como se muestra en la Figura 62, en donde el mayor valor se produce cuando el porcentaje de betún es de 6.5%, obteniéndose como resultado una gravedad específica de  $2.334 \text{ g/cm}^3$ . Por otra parte, la estabilidad tiene una tendencia cóncava conforme se incrementa el porcentaje de asfalto, como se ve en la Figura 63, en donde el máximo valor de estabilidad se produce cuando el contenido de asfalto es de 6.3% resultando así, una estabilidad de alrededor de 6130 lb. Sin embargo, al observar el comportamiento del porcentaje de vacíos llenos de asfalto mostrado en la Figura 64 se mantiene una tendencia creciente, mientras el porcentaje de betún asfáltico incrementa.

La Figura 65 representa el porcentaje de vacíos en el agregado mineral, en donde se forma una curva convexa en la cual el menor valor se efectúa cuando el porcentaje de asfalto es de 5.6% resultando un 19.5% de vacíos minerales.

Finalmente, en la Figura 66 se muestra la tendencia que sigue el flujo, en donde se presenta una mayor deformación cuando el porcentaje de asfalto aumenta.



### ENSAYO MARSHALL - PATRÓN

% Asfalto	5.0			5.5			6.0			6.5			7.0		
Nro. Briqueata	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
Peso Aire [g.]	1211.97	1211.24	1212.48	1208.80	1209.35	1207.27	1209.93	1209.51	1209.74	1209.05	1209.90	1209.78	1205.79	1206.00	1206.95
Peso SSS [g.]	1212.50	1212.80	1213.20	1209.00	1210.90	1208.60	1210.60	1210.10	1210.30	1210.40	1210.30	1210.80	1206.40	1207.50	1207.00
Peso Agua [g.]	687.00	687.20	687.50	687.00	689.50	688.60	692.40	692.40	692.30	691.00	691.80	691.90	689.10	689.50	689.90
Volumen Desplazado [cm <sup>3</sup> ]	525.50	525.60	525.70	522.00	521.40	520.00	518.20	517.70	518.00	519.40	518.50	518.90	517.30	518.00	517.10
Gravedad Especifica Gmb (Bulk) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.306	2.304	2.306	2.316	2.319	2.322	2.335	2.336	2.335	2.328	2.333	2.331	2.331	2.328	2.334
Promedio Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.306</b>			<b>2.319</b>			<b>2.336</b>			<b>2.331</b>			<b>2.331</b>		
Gravedad Especifica Teórica Máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.495</b>			<b>2.476</b>			<b>2.457</b>			<b>2.438</b>			<b>2.420</b>		
% Vacíos Total (Va)	7.563	7.637	7.560	6.469	6.319	6.228	4.971	4.912	4.949	4.537	4.304	4.388	3.685	3.799	3.555
Promedio % Vacíos	<b>7.587</b>			<b>6.338</b>			<b>4.944</b>			<b>4.410</b>			<b>3.680</b>		
%Vacíos en el Agregado Mineral VMA	19.599	19.663	19.596	19.696	19.567	19.490	19.460	19.411	19.442	20.132	19.937	20.007	20.452	20.545	20.344
Promedio VMA [%]	<b>19.619</b>			<b>19.585</b>			<b>19.438</b>			<b>20.025</b>			<b>20.447</b>		
%Vacíos Llenos de Asfalto VFA	61.409	61.162	61.420	67.158	67.709	68.045	74.457	74.695	74.545	77.463	78.411	78.070	81.981	81.511	82.525
Promedio VFA [%]	<b>61.330</b>			<b>67.637</b>			<b>74.566</b>			<b>77.981</b>			<b>82.006</b>		
Flujo [mm]	3.01	1.71	2.70	1.93	2.75	3.61	3.00	3.74	3.36	3.54	3.76	3.54	4.25	3.10	4.58
Promedio Flujo [mm]	<b>2.473</b>			<b>2.763</b>			<b>3.367</b>			<b>3.613</b>			<b>3.977</b>		
Estabilidad Sin Corregir [Ib]	4669.43	4694.27	4259.61	5588.41	6010.65	6879.96	4917.80	5501.48	5811.95	6612.66	6470.14	5898.88	5515.53	5679.90	5751.48
Factor Corrección	0.96	0.96	0.96	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Estabilidad Corregida [Ib]	4482.65	450650	4089.23	5588.41	6010.65	6879.96	4917.80	5501.48	5811.95	6612.66	6470.14	5898.88	5515.53	5679.90	5751.48
Promedio Estabilidad [Ib]	<b>4359.46</b>			<b>6159.67</b>			<b>5410.41</b>			<b>6327.23</b>			<b>5648.97</b>		

Tabla 23. Resultados del ensayo Marshall (Muestra patrón).



### % CONTENIDO DE VACÍOS

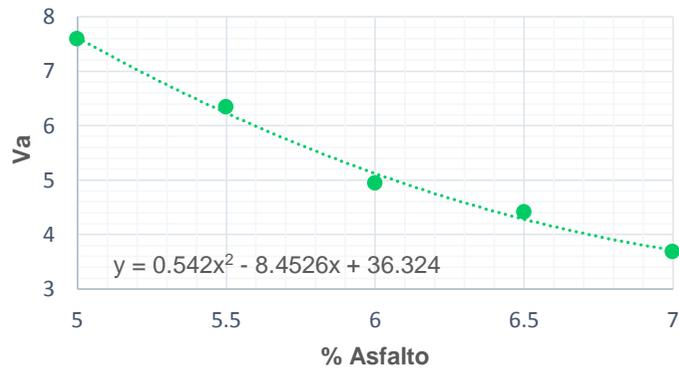


Figura 61. Contenido de vacíos (Muestra patrón).

### DENSIDAD ESPECÍFICA

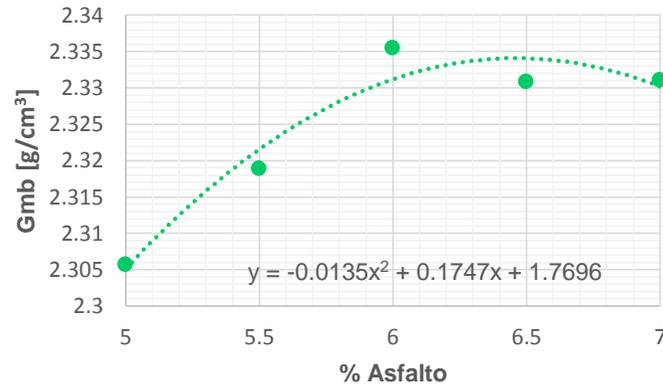


Figura 62. Peso específico (Muestra patrón).

### ESTABILIDAD

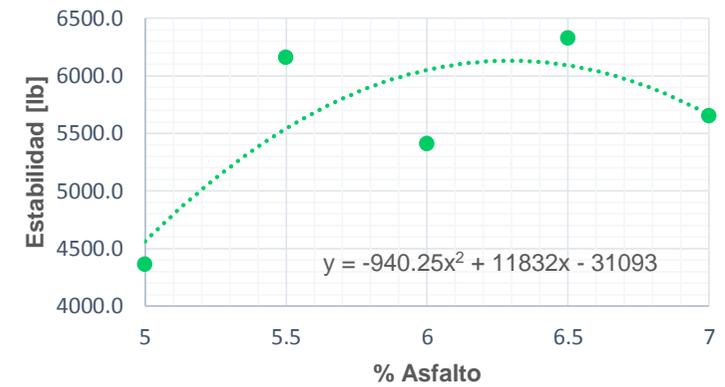


Figura 63. Estabilidad (Muestra patrón).

### % VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

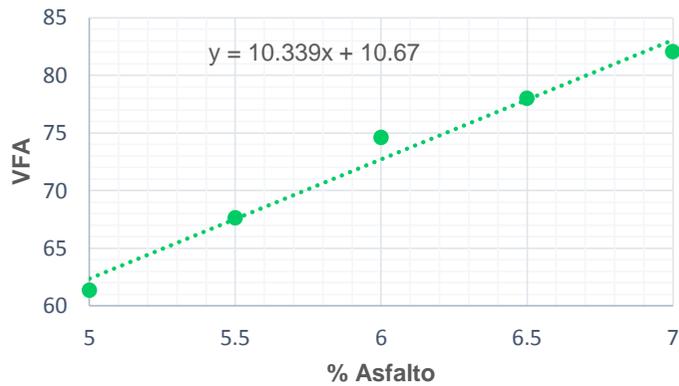


Figura 64. VFA (Muestra patrón).

### % VACÍOS AGREGADO MINERAL

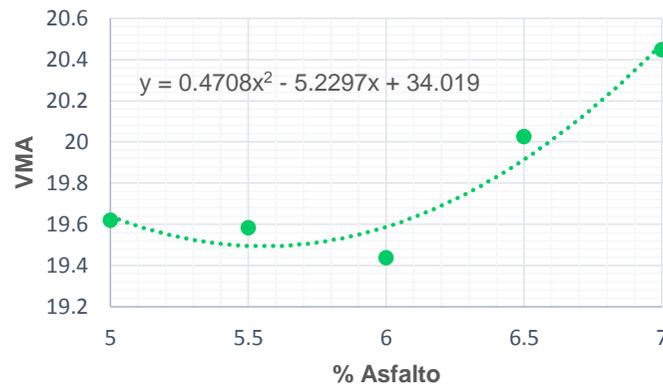


Figura 65. VMA (Muestra patrón).

### FLUJO

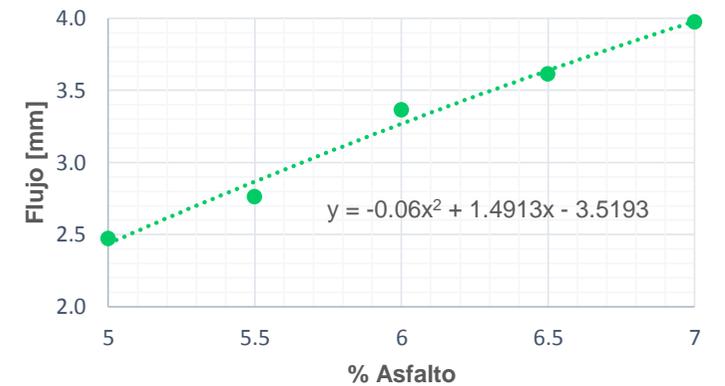


Figura 66. Flujo (Muestra patrón).



A continuación, se muestra un resumen de los valores obtenidos en el ensayo Marshall, en donde el porcentaje óptimo de asfalto se encontrará dentro de los rangos establecidos por los criterios de la National Asphalt Pavement Association (NAPA).

Además, en la Tabla 24 se muestra adicionalmente los rangos que debe cumplirse cuando se está diseñando una mezcla asfáltica para un tráfico mediano. Sin embargo, los valores en rojo están fuera del rango establecido, con lo cual se estima que el porcentaje óptimo de asfalto se encuentre entre 6 o 6.5%.

% Asfalto	Parámetros					Rangos NAPA	
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	MIN	MAX
%Va	7.587	6.338	4.944	4.410	3.680	3	5
%VMA	19.619	19.585	19.438	20.025	20.447	14	-
%VFA	61.330	67.637	74.566	77.981	82.006	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2.306	2.319	2.336	2.331	2.331	-	-
Estabilidad [lb]	4359.459	6159.673	5410.410	6327.227	5648.970	1200	-
Flujo [mm]	2.473	2.763	3.367	3.613	3.977	2	4

\* Valores en rojo fuera del rango

Tabla 24. Resumen de los resultados con la muestra patrón.

### 3.2.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto es necesario seguir las recomendaciones propuestas por la National Asphalt Pavement Association (NAPA).

- Determinar el porcentaje de asfalto con el cual se produzca el mayor valor de estabilidad.
- Determinar el porcentaje de asfalto con el que resulte el mayor valor de densidad específica (Gmb)
- Determinar cuál es el porcentaje de asfalto perteneciente al 4% de vacíos totales.

Luego de identificado cada porcentaje se procede a realizar una media ponderada para obtener el porcentaje óptimo de asfalto. En la Tabla 25 se detalla los porcentajes para el cálculo del promedio, dando como resultado un porcentaje óptimo de 6.5% de asfalto para la mezcla asfáltica patrón.

%Óptimo de Asfalto	
% Asfalto (Estabilidad)	6.3
% Asfalto (Densidad específica)	6.5
% Asfalto (Vacíos Totales)	6.7
<b>% Asfalto Promedio</b>	<b>6.5</b>

Tabla 25. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra patrón.

Los valores de los parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de betún de 6.5%, se obtuvieron de las diferentes ecuaciones de regresión presentes en cada gráfica, en la Tabla 26 se presentan dichos parámetros.



<b>%Óptimo de Asfalto</b>	<b>6.50</b>
<b>%Va</b>	4.41
<b>%VMA</b>	20.03
<b>%VFA</b>	77.98
<b>Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.33
<b>Estabilidad [lb]</b>	6 327.23
<b>Flujo [mm]</b>	3.61

Tabla 26. Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – Muestra patrón.

### 3.3. Mezcla asfáltica con vidrio

El diseño y el análisis de la mezcla asfáltica modificada con vidrio se lo realiza de la misma manera como si se tratara de una mezcla asfáltica convencional, con la única diferencia que se adiciona un agregado más al diseño y este es el vidrio, además, se debe cumplir con las mismas especificaciones técnicas de la mezcla asfáltica convencional.

#### 3.3.1. Análisis de la mezcla asfáltica con el 5% vidrio

##### 3.3.1.1. Dosificación de la mezcla modificada con 5% de vidrio

Se tiene 6 áridos: árido A (agregado 3/8), árido B (agregado 5/8), árido C (agregado 3/16), árido D (arena), árido E (vidrio) y árido F (cal hidratada); estos se combinan por el método del tanteo, asegurándonos que el árido E esté presente en la combinación solo con 5%.

**MEZCLA MODIFICADA CON 5% DE VIDRIO**

Tamiz	Tamiz [mm]	3/8"	5/8"	3/16"	ARENA	VIDRIO	CAL	Granulometría Combinada	Especificaciones	
		Árido A	Árido B	Árido C	Árido D	Árido E	Árido F		Lim. Inferior	Lim. Superior
		% Pasa								
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100.00	100.00
3/4"	19	100	99.74	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>99.90</b>	90.00	100.00
1/2"	12.5	99.96	52.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>80.80</b>	67.00	85.00
3/8"	9.5	99.84	28.85	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>71.53</b>	56.00	80.00
#4	4.75	11.5	0.00	96.59	85.46	95.11	100.00	<b>48.58</b>	35.00	65.00
#8	2.38	1.78	0.00	65.44	66.89	54.46	100.00	<b>35.79</b>	23.00	49.00
#10	2	1.19	0.00	58.01	62.17	48.09	100.00	<b>32.90</b>	20.00	45.00
#16	1.19	0.58	0.00	40.00	51.00	32.62	100.00	<b>26.05</b>	15.00	37.00
#30	0.59	0.16	0.00	35.00	30.00	18.78	100.00	<b>16.85</b>	8.00	26.00
#40	0.42	0	0.00	25.00	25.00	16.00	100.00	<b>13.80</b>	6.00	22.00
#50	0.297	0	0.00	21.00	22.00	13.00	62.28	<b>11.73</b>	5.00	19.00
#100	0.149	0	0.00	16.00	16.00	8.00	24.70	<b>8.33</b>	3.00	14.00
#200	0.074	0	0.00	7.00	10.00	3.00	11.30	<b>4.76</b>	2.00	8.00

Tabla 27. Dosificación de la mezcla con 5% de vidrio.



En Tabla 27 y los Anexo 44 - Anexo 45 se detalla la combinación de los agregados y por otra parte en la Tabla 28 se tiene los porcentajes resultantes de dicha combinación.

El árido B sigue mantenido el mayor y el mismo porcentaje de combinación como si estuviera en la mezcla asfáltica convencional, los áridos con mayor aporte de finos son los que se han combinado con el 5% de vidrio de tal manera que la combinación es muy cercana a la media propuesta por las especificaciones técnicas de la NEVI-12, tal y como se puede observar en la Figura 67. Además, la dosificación cumple con los requisitos de gradación para mezclas asfálticas densas mostradas en la Tabla 1 con graduación perteneciente al tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm.

% DE MEZCLA		
6.0	Árido A	3/8"
40.0	Árido B	5/8"
10.0	Árido C	3/16"
38.0	Árido D	ARENA
5.0	Árido E	VIDRIO
1.0	Árido F	CAL

Tabla 28. Porcentaje de combinación (5% vidrio).

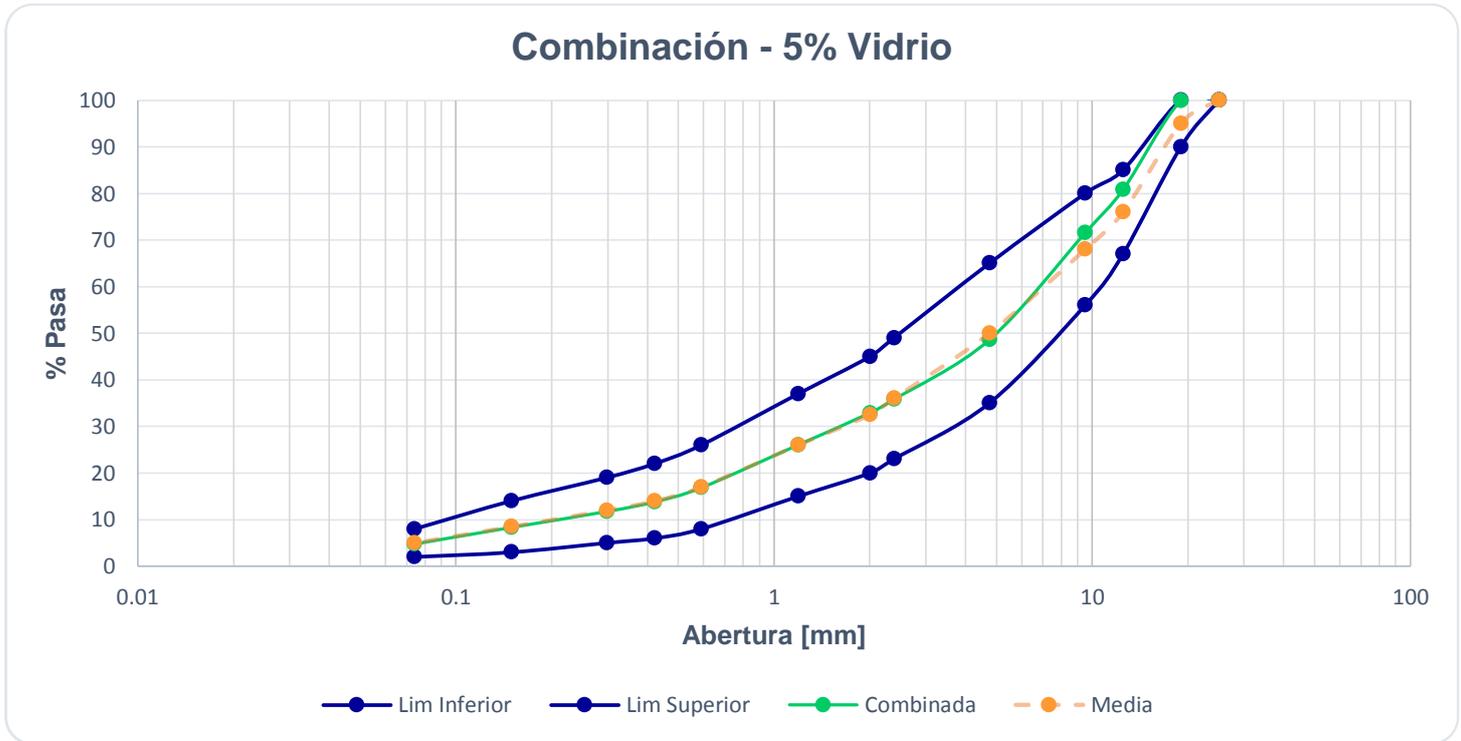


Figura 67. Combinación de la curva granulométrica con 5% vidrio.



### 3.3.1.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Se realizó el ensayo Rice usando el 6% de betún asfáltico, obteniendo el valor de 2.433 g/cm<sup>3</sup> de gravedad específica teórica máxima (Gmm). Luego este valor se usa para determinar Gmm con los distintos porcentajes de betún ensayados.

El detalle del cálculo se presenta en la Tabla 29.

Porcentaje de Asfalto	6.0%	
Porcentaje de vidrio	5% Vidrio	
A. Peso del Material [g.]	1500	1500
B. Peso Picnómetro + Agua [g.]	7253	7251.3
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [g.]	8133	8138
Peso Específico Máximo Muestra (Gmm) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.419	2.446
Promedio Gmm [g/cm <sup>3</sup> ] $Gmm = \frac{A}{A + B - C}$	<b>2.433</b>	

Tabla 29. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (5% vidrio).

### 3.3.1.3. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados

Al igual que con la mezcla asfáltica convencional se realizaron 15 briquetas con 5 diferentes contenidos de betún (5, 5.5, 6, 6.5, 7%), para posteriormente ser ensayadas en el equipo Marshall.

En la Tabla 30 se presentan los resultados obtenidos y procesados del ensayo; los datos que arroja el ensayo inicialmente son la estabilidad y el flujo para cada porcentaje de betún que luego serán graficados.

Para el cálculo de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas (Va, VMA, VFA) es necesario calcular la gravedad específica neta del agregado (Gsb) y la gravedad específica efectiva del agregado (Gse); en el primer cálculo intervienen las gravedades específicas secas de cada agregado incluida la del vidrio, el valor que se obtuvo es de 2.676 g/cm<sup>3</sup> y el valor de Gse luego del cálculo fue de 2.673 g/cm<sup>3</sup>.

En la Tabla 30 se puede ver que cada propiedad volumétrica de la mezcla asfáltica, estabilidad y flujo tienen 5 puntos promedios, mismos que serán graficados para su posterior interpretación y se tiene:

- La Figura 68 tiene graficado el contenido de vacíos de aire (Va) vs el % de asfalto, se nota que el Va disminuye conforme aumenta el porcentaje de betún, haciendo que la gráfica vaya decreciendo y tenga un valor mínimo de 3.005 con 7% de betún.
- La Figura 69 grafica el peso específico (Gmb) versus el % de asfalto, donde se nota que mientras incrementa el porcentaje de betún, el peso



específico también incrementa hasta llegar a un máximo y luego el valor decrece mientras incrementa el porcentaje de betún, por lo cual la gráfica tiene una concavidad hacia abajo. El valor máximo se obtiene con 5,8% de betún.

- En la Figura 70 se grafica la Estabilidad vs el % de asfalto, el valor máximo se obtiene con el mayor porcentaje de betún, es decir, con el 7%.
- De la Figura 71, presenta el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) vs el %Pb, se puede apreciar que la tendencia del VFA es creciente conforme el contenido de asfalto incrementa y el valor máximo se tiene con el 7% de betún.
- La Figura 72 grafica el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs el % de asfalto, la tendencia de la gráfica es creciente, es decir, que él VMA incrementa conforme el porcentaje de betún también lo hace, teniendo un máximo con 7% de betún.
- Finalmente, la Figura 73 grafica el Flujo vs el % de asfalto, la cual presenta ligeramente una concavidad hacia abajo tenido su máximo valor con valores de entre 6.5 y 7 % de betún.



### ENSAYO MARSHALL - 5% VIDRIO

% Asfalto	5.0			5.5			6.0			6.5			7		
BRIQUETA	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
Peso Aire [g.]	1208.04	1207.92	1205.35	1208.36	1209.85	1210.00	1209.69	1208.83	1206.46	1206.87	1206.26	1206.46	1207.31	1208.51	1208.22
Peso SSS [g.]	1209.40	1210.90	1207.60	1210.30	1210.40	1211.20	1210.30	1211.20	1209.60	1209.40	1208.90	1209.10	1211.40	1211.30	1210.50
Peso Agua [g.]	690.20	693.30	688.00	690.30	689.70	694.00	691.30	691.80	692.20	693.80	689.30	687.70	691.70	690.40	692.40
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	519.20	517.60	519.60	520.00	520.70	517.20	519.00	519.40	517.40	515.60	519.60	521.40	519.70	520.90	518.10
Gravedad Específica Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2.327	2.334	2.320	2.324	2.324	2.340	2.331	2.327	2.332	2.341	2.322	2.314	2.323	2.320	2.332
Promedio Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.327</b>			<b>2.329</b>			<b>2.330</b>			<b>2.325</b>			<b>2.325</b>		
Gravedad Específica Teórica Máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	<b>2.470</b>			<b>2.451</b>			<b>2.433</b>			<b>2.415</b>			<b>2.397</b>		
% Vacíos Total (Va)	5.801	5.519	6.083	5.205	5.216	4.563	4.200	4.342	4.161	3.072	3.867	4.183	3.086	3.213	2.714
Promedio % Vacíos [%]	<b>5.801</b>			<b>4.995</b>			<b>4.234</b>			<b>3.707</b>			<b>3.005</b>		
%Vacíos en el Agregado Mineral VMA	17.390	17.143	17.638	17.930	17.939	17.373	18.117	18.238	18.083	18.206	18.877	19.144	19.256	19.362	18.946
Promedio VMA [%]	<b>17.390</b>			<b>17.747</b>			<b>18.146</b>			<b>18.742</b>			<b>19.188</b>		
%Vacíos Llenos de Asfalto VFA	66.642	67.805	65.510	70.968	70.923	73.737	76.816	76.192	76.992	83.125	79.514	78.149	83.972	83.403	85.676
Promedio VFA [%]	<b>66.652</b>			<b>71.876</b>			<b>76.667</b>			<b>80.263</b>			<b>84.350</b>		
Flujo [mm]	3.542	3.460	3.130	3.015	2.718	3.756	4.053	3.509	3.130	3.905	2.900	6.293	3.163	3.608	4.152
Promedio Flujo [mm]	<b>3.377</b>			<b>3.163</b>			<b>3.564</b>			<b>4.366</b>			<b>3.641</b>		
Estabilidad Sin Corregir [lb]	5644.59	5806.04	5775.29	5725.02	4769.37	5147.85	5706.69	5445.89	5483.15	5657.01	5452.40	5749.86	5864.88	5734.78	5892.97
Factor Corrección	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Estabilidad Corregida [lb]	5644.59	5806.04	5775.29	5725.02	4769.37	5147.85	5706.69	5445.89	5483.15	5657.01	5452.40	5749.86	5864.88	5734.78	5892.97
Promedio Estabilidad [lb]	<b>5741.97</b>			<b>5214.08</b>			<b>5545.24</b>			<b>5619.76</b>			<b>5830.87</b>		

Tabla 30. Resultados del ensayo Marshall (5% vidrio).



### % CONTENIDO DE VACÍOS

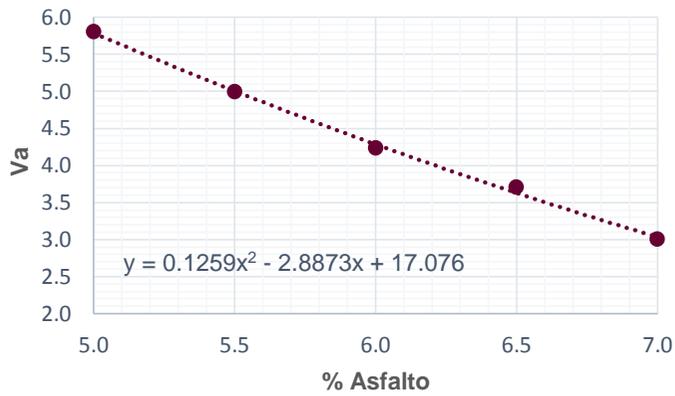


Figura 68. Contenido de vacíos (5% vidrio).

### PESO ESPECÍFICO

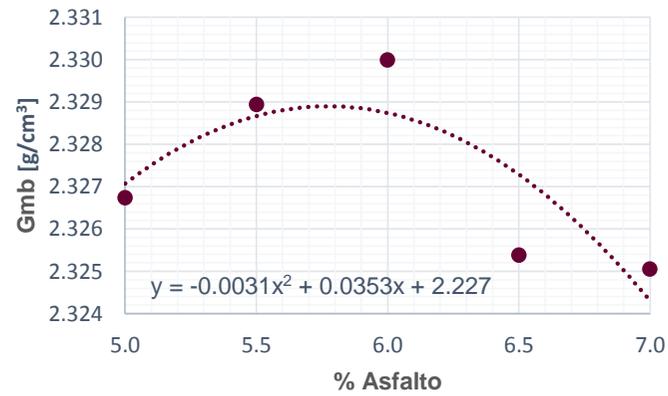


Figura 69. Peso específico (5% vidrio).

### ESTABILIDAD

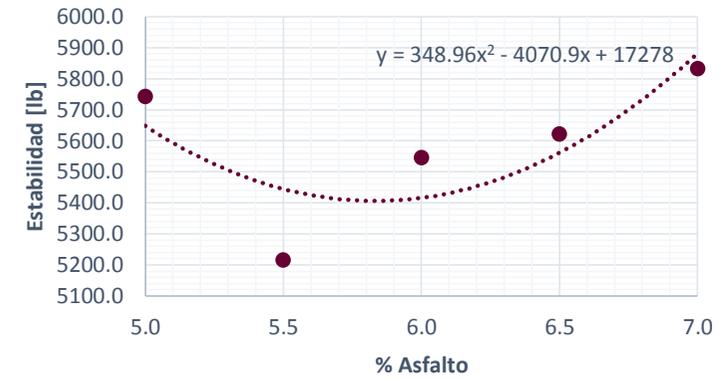


Figura 70. Estabilidad (5% vidrio).

### % VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

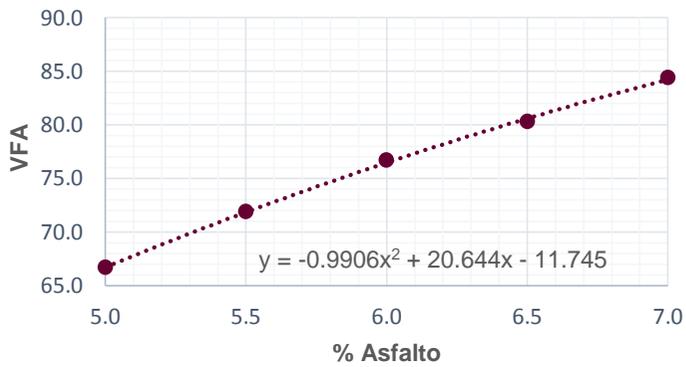


Figura 71. VFA (5% vidrio).

### % VACÍOS AGREGADO MINERAL

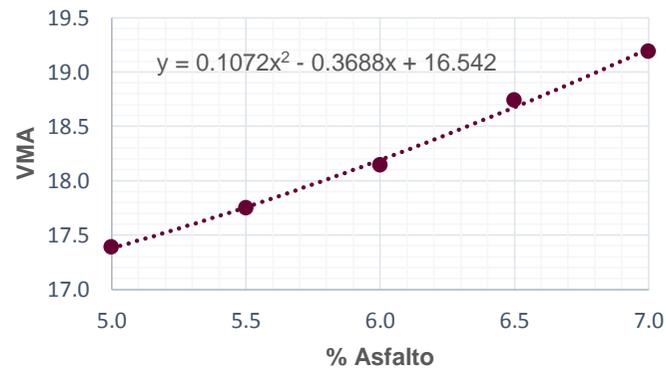


Figura 72. VMA (5% vidrio).

### FLUJO

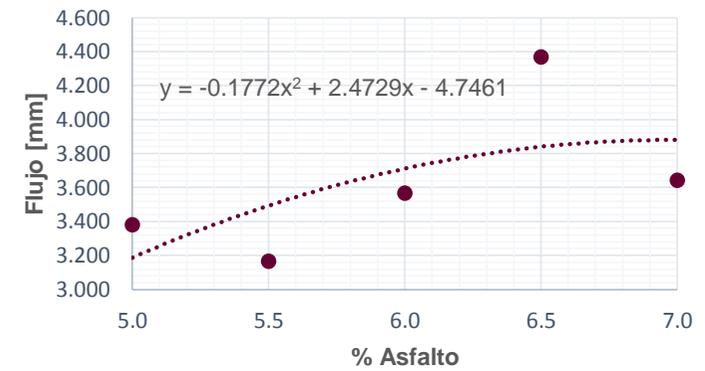


Figura 73. Flujo (5% vidrio).



En la Tabla 31 se muestra un resumen de los valores obtenidos en el ensayo Marshall, además de una columna con los rangos máximos y mínimos establecidos que debe cumplir una mezcla asfáltica para tráfico mediano.

Los valores que tienen el color rojo son aquellos que están fuera del rango y no cumplen con las especificaciones mínimas requeridas. Las únicas muestras que cumplen con los rangos son aquellas que contienen el 5.5 y 6.0 % de betún.

% Asfalto	Parámetros – 5% de vidrio					Rangos NAPA	
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	MIN	MAX
%Va	5,801	4,995	4,234	3,707	3,005	3	5
%VMA	17,390	17,747	18,146	18,742	19,188	14	-
%VFA	66,652	71,876	76,667	80,263	84,350	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2,327	2,329	2,330	2,325	2,325	-	-
Estabilidad [lb]	5741.972	5214.079	5545.244	5619.756	5830.874	1200	-
Flujo [mm]	3,377	3,163	3,564	4,366	3,641	2	4

\* Valores en rojo fuera de rango

Tabla 31. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 5% vidrio.

### 3.3.1.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto es necesario seguir las recomendaciones propuestas por la NAPA.

De las gráficas anteriores se obtiene los valores requeridos por el criterio NAPA, mismo que se muestran en la Tabla 32 y se obtiene como resultado un porcentaje óptimo de 6.33% de asfalto para una mezcla asfáltica con 5% de contenido de vidrio triturado.

%Óptimo de Asfalto	
% Asfalto (Estabilidad)	7.0
% Asfalto (Densidad específica)	5.8
% Asfalto (Vacíos Totales)	6.2
<b>% Asfalto Promedio</b>	<b>6.33</b>

Tabla 32. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 5% de vidrio.

Los valores de los diferentes parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de betún de 6.33%, se obtienen de las ecuaciones de regresión presentes en cada gráfica, en la Tabla 33 se presentan dichos parámetros.

<b>%Óptimo de Asfalto</b>	<b>6.33</b>
<b>%Va</b>	3.89
<b>%VMA</b>	18.54
<b>%VFA</b>	79.04
<b>Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.33
<b>Estabilidad [lb]</b>	5 594.42
<b>Flujo [mm]</b>	4.09

Tabla 33. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 5% vidrio.



### 3.3.2. Análisis de la mezcla asfáltica con 10% de vidrio

#### 3.3.2.1. Dosificación de la mezcla modificada con 10% de vidrio

Se tiene 6 áridos: árido A (agregado 3/8), árido B (agregado 5/8), árido C (agregado 3/16), árido D (arena), árido E (vidrio) y árido F (cal hidratada); estos se combinan por el método del tanteo, asegurándonos que el árido E esté presente en la combinación con un 10%.

**MEZCLA MODIFICADA CON 10% DE VIDRIO**

Tamiz	Tamiz mm	3/8"	5/8"	3/16"	ARENA	VIDRIO	CAL	Granulometría Combinada	Especificaciones	
		Árido A	Árido B	Árido C	Árido D	Árido E	Árido F		Lim. Inferior	Lim. Superior
		% Pasa								
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100.00	100.00
3/4"	19	100	99.74	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>99.90</b>	90.00	100.00
1/2"	12.5	99.96	52.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>80.80</b>	67.00	85.00
3/8"	9.5	99.84	28.85	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>71.53</b>	56.00	80.00
#4	4.75	11.5	0.00	96.59	85.46	95.11	100.00	<b>50.32</b>	35.00	65.00
#8	2.38	1.78	0.00	65.44	66.89	54.46	100.00	<b>36.50</b>	23.00	49.00
#10	2	1.19	0.00	58.01	62.17	48.09	100.00	<b>33.50</b>	20.00	45.00
#16	1.19	0.58	0.00	40.00	51.00	32.62	100.00	<b>26.35</b>	15.00	37.00
#30	0.59	0.16	0.00	35.00	30.00	18.78	100.00	<b>16.78</b>	8.00	26.00
#40	0.42	0	0.00	25.00	25.00	16.00	100.00	<b>13.85</b>	6.00	22.00
#50	0.297	0	0.00	21.00	22.00	13.00	62.28	<b>11.74</b>	5.00	19.00
#100	0.149	0	0.00	16.00	16.00	8.00	24.70	<b>8.25</b>	3.00	14.00
#200	0.074	0	0.00	7.00	10.00	3.00	11.30	<b>4.67</b>	2.00	8.00

Tabla 34. Dosificación de la mezcla con 10% vidrio.

En Tabla 34 y los Anexo 46 - Anexo 47 se detalla la combinación de los agregados y en la Tabla 35 se tiene los porcentajes resultantes de dicha combinación. El árido B mantiene el mismo porcentaje de combinación como en una mezcla asfáltica convencional, los áridos con mayor aporte de finos son los que se han combinado con el 10% de vidrio de tal manera que la combinación es muy cercana a la media propuesta por las especificaciones técnicas de la NEVI-12, tal y como se puede observar en la Figura 74, además, la dosificación cumple con los requisitos de gradación para mezclas asfálticas densas mostradas en la Tabla 1 con graduación perteneciente al tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm.

% DE LA MEZCLA		
<b>4.0</b>	Árido A	3/8
<b>40.0</b>	Árido B	5/8
<b>8.0</b>	Árido C	3/16
<b>37.0</b>	Árido D	ARENA
<b>10.0</b>	Árido E	VIDRIO
<b>1.0</b>	Árido F	CAL

Tabla 35. Porcentaje de combinación (10% vidrio).

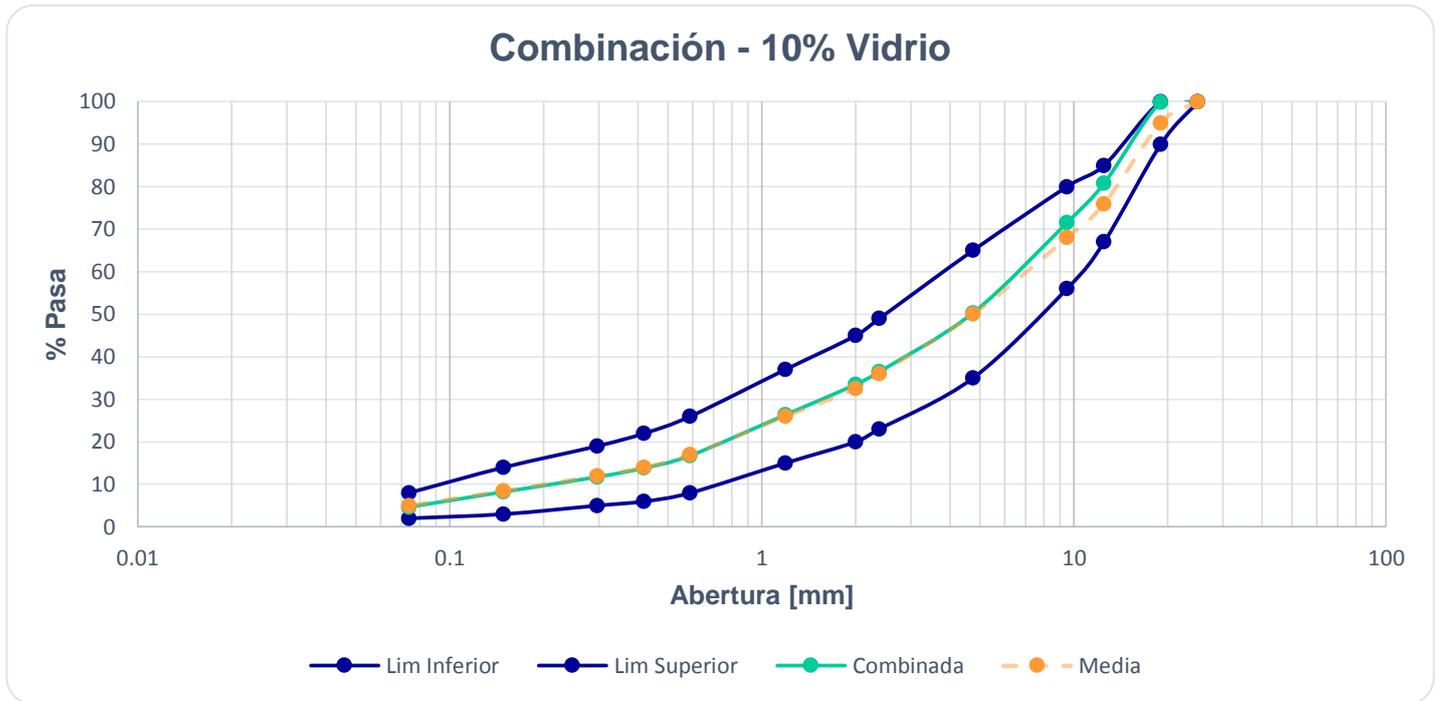


Figura 74. Combinación curva granulométrica (10% vidrio).

### 3.3.2.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Se realizó el ensayo Rice usando el 6% de betún asfáltico, obteniendo el valor de 2.419 g/cm<sup>3</sup> de gravedad específica teórica máxima (Gmm), como se detalla en la Tabla 36. Posteriormente, este valor se usa para determinar Gmm con los distintos porcentajes de betún ensayados.

Porcentaje de Asfalto	6.0%	
Porcentaje de vidrio	10% Vidrio	
A. Peso del Material [g.]	1500	1500
B. Peso Picnómetro + Agua [g.]	7251.7	7251.3
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [g.]	8134	8129
Peso Específico Máximo Muestra Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	2.428	2.410
Promedio Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$	
	<b>2.419</b>	

Tabla 36. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (10% vidrio).

### 3.3.2.3. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados

Se realizaron 15 briquetas con 5 diferentes contenidos de betún (5, 5.5, 6, 6.5, 7%), para posteriormente ser ensayadas en el equipo Marshall.

En la Tabla 37 se presentan los resultados obtenidos y procesados del ensayo.; para el cálculo de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas asfáltica (Va, VMA, VFA) es necesario calcular la gravedad específica neta del



agregado ( $G_{sb}$ ) y la gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ); en el primer cálculo intervienen las gravedades específicas secas de cada agregado incluida la del vidrio, el valor que se obtuvo es de  $2.629 \text{ g/cm}^3$  y el valor de  $G_{se}$  luego del cálculo fue de  $2.655 \text{ g/cm}^3$ .

En la Tabla 37 se puede ver que cada propiedad volumétrica de la mezcla asfáltica, estabilidad y flujo tienen 5 puntos promedios mismos que serán graficados para su posterior interpretación y se tiene:

- La Figura 75 tiene graficado el contenido de vacíos de aire ( $V_a$ ) vs el % de asfalto y se nota que el  $V_a$  disminuye conforme aumenta el porcentaje de betún, haciendo que la gráfica vaya decreciendo y tenga un valor mínimo de 2.602 con el 7% de betún.
- La Figura 76 grafica el peso específico ( $G_{mb}$ ) vs el % de asfalto y la gráfica resultante tiene una ligera concavidad hacia abajo, teniendo un punto máximo con el 6,1 % de betún.
- En la Figura 77 se grafica la Estabilidad vs el % de asfalto y se observa que mientras incrementa el porcentaje de betún también lo hace la estabilidad, hasta llegar a un punto máximo con el 6.1% de betún, para luego empezar a decrecer en los siguientes porcentajes.
- De la Figura 78 que grafica el porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA) vs el % de asfalto se puede decir que la tendencia del VFA es creciente conforme el contenido de asfalto incrementa, el valor máximo se tiene con 7% de betún.
- La Figura 79 grafica el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA) vs el % de asfalto, la tendencia de la gráfica es creciente es decir que él VMA incrementa conforme el porcentaje de betún también lo hace, teniendo un máximo con 7% de betún.
- Finalmente, la Figura 80 grafica el Flujo vs el % de asfalto, en esta se puede ver que el valor del flujo aumenta con el porcentaje de betún hasta llegar a un punto máximo luego del cual decrece, el punto máximo se alcanza con el 6.1% de betún.



### ENSAYO MARSHALL - 10% VIDRIO

% Asfalto	5.00			5.50			6			6.5			7		
	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
<b>Briqueta</b>															
<b>Peso Aire [g.]</b>	1213.30	1205.10	1213.60	1212.20	1211.62	1215.80	1212.70	1217.60	1214.00	1214.20	1214.80	1208.00	1209.10	1210.90	1215.70
<b>Peso SSS [g.]</b>	1215.02	1207.59	1214.86	1214.04	1213.00	1216.37	1214.97	1219.36	1216.29	1215.60	1216.41	1210.29	1210.48	1212.57	1219.01
<b>Peso Agua [g.]</b>	690.20	691.40	691.40	692.10	691.00	693.40	696.10	691.60	692.40	690.80	692.90	692.90	691.10	692.30	692.60
<b>Volumen [cm3]</b>	524.82	516.19	523.46	521.94	522.00	522.97	518.87	527.76	523.89	524.80	523.51	517.39	519.38	520.27	526.41
<b>Gravedad Específica Neta [g/cm³]</b>	2.312	2.335	2.318	2.322	2.321	2.325	2.337	2.307	2.317	2.314	2.320	2.335	2.328	2.327	2.309
<b>Promedio Gmb [g/cm³]</b>	<b>2.322</b>			<b>2.323</b>			<b>2.321</b>			<b>2.323</b>			<b>2.322</b>		
<b>Gravedad Específica Teórica Máxima [g/cm³]</b>	<b>2.455</b>			<b>2.437</b>			<b>2.419</b>			<b>2.401</b>			<b>2.384</b>		
<b>% Vacíos Total (Va)</b>	5.848	4.921	5.580	4.702	4.759	4.607	3.382	4.625	4.205	3.646	3.360	2.765	2.335	2.357	3.113
<b>Promedio % Vacíos</b>	<b>5.450</b>			<b>4.689</b>			<b>4.071</b>			<b>3.257</b>			<b>2.602</b>		
<b>%Vacíos en el Agregado Mineral VMA</b>	16.464	15.642	16.227	16.521	16.571	16.438	16.437	17.513	17.149	17.719	17.476	16.967	17.652	17.671	18.309
<b>Promedio VMA [%]</b>	<b>16.111</b>			<b>16.510</b>			<b>17.033</b>			<b>17.387</b>			<b>17.877</b>		
<b>%Vacíos Llenos de Asfalto VFA</b>	64.479	68.538	65.610	71.539	71.282	71.971	79.426	73.588	75.480	79.425	80.770	83.705	86.773	86.662	82.996
<b>Promedio VFA [%]</b>	<b>66.209</b>			<b>71.598</b>			<b>76.164</b>			<b>81.300</b>			<b>85.477</b>		
<b>Flujo [mm]</b>	2.883	2.966	2.949	3.41	3.064	2.933	3.855	3.394	3.789	3.987	3.674	3.756	3.674	2.916	2.488
<b>Promedio Flujo [mm]</b>	2.933			3.136			3.679			3.806			3.026		
<b>Estabilidad Sin Corregir [lb]</b>	4263.52	4498.17	4495.57	5234.78	5258.31	5209.94	5902.13	5905.39	6032.83	6241.34	6228.92	6117.15	4346.55	4594.92	4917.81
<b>Factor Corrección</b>	0.96	1	0.96	1	1	1	1	0.96	0.96	0.96	0.96	1	1	1	0.96
<b>Estabilidad Corregida [lb]</b>	4092.98	4498.17	4315.74	5234.78	5258.31	5209.94	5902.13	5669.17	5791.51	5991.69	5979.77	6117.15	4346.55	4594.92	4721.09
<b>Promedio Estabilidad [lb]</b>	4302.30			5234.34			5787.61			6029.54			4554.19		

Tabla 37. Resultados del ensayo Marshall (10% vidrio).



### % CONTENIDO DE VACÍOS

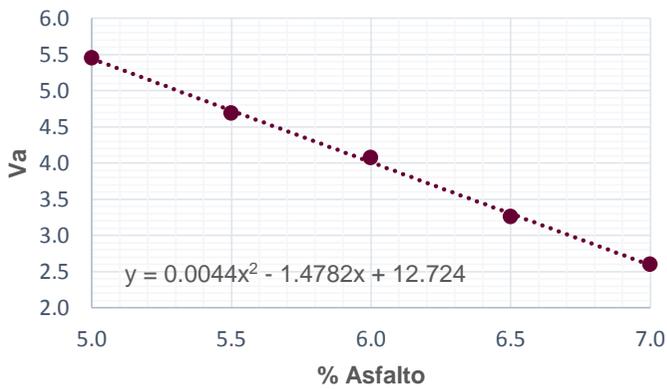


Figura 75. Contenido de vacíos (10% vidrio).

### PESO ESPECÍFICO

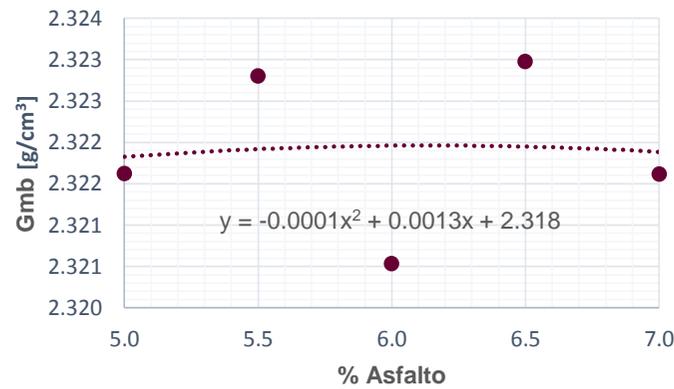


Figura 76. Peso específico (10% vidrio).

### ESTABILIDAD

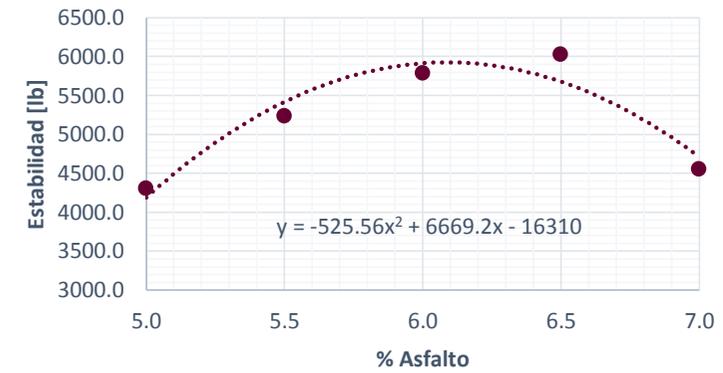


Figura 77. Estabilidad (10% vidrio).

### % VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

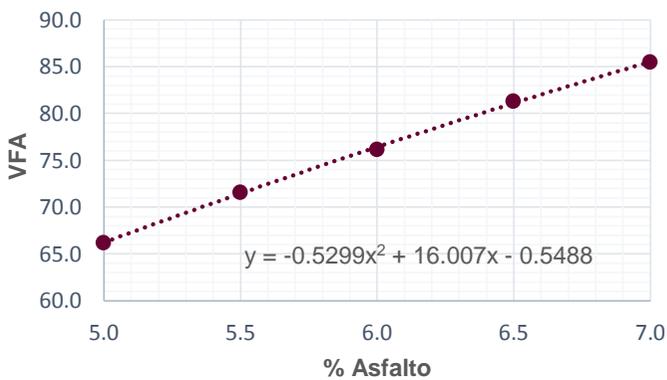


Figura 78. VFA (10% vidrio).

### % VACÍOS AGREGADO MINERAL

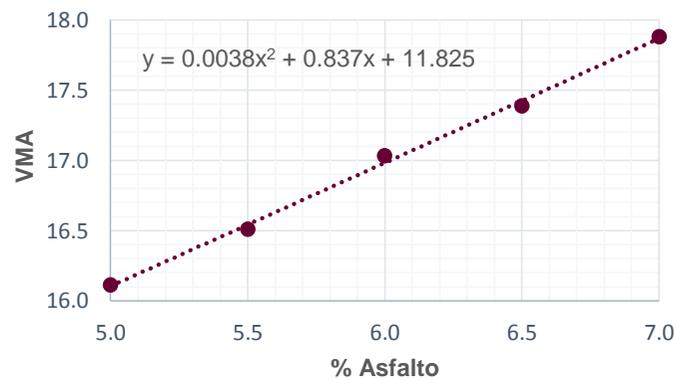


Figura 79. VMA (10% vidrio).

### FLUJO

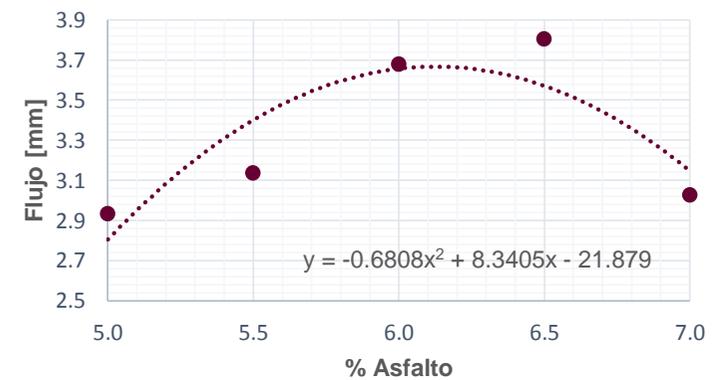


Figura 80. Flujo (10% vidrio).



En la Tabla 38 se muestra un resumen de los valores obtenidos en el ensayo Marshall, además de una columna con los rangos máximos y mínimos establecidos que debe cumplir una mezcla asfáltica para tráfico mediano.

Los valores que tienen el color rojo son aquellos que están fuera del rango y no cumplen con las especificaciones mínimas requeridas. Las únicas muestras que cumplen con todos los rangos son aquellas que contienen el 5.5 y 6.0% de betún.

Parámetros – 10% de vidrio						Rangos NAPA	
% Asfalto	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	MIN	MAX
%Va	5,450	4,689	4,071	3,257	2,602	3	5
%VMA	16,111	16,510	17,033	17,387	17,877	14	-
%VFA	66,209	71,598	76,164	81,300	85,477	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2,322	2,323	2,321	2,323	2,322	-	-
Estabilidad [lb]	4302,298	5234,343	5787,606	6029,536	4554,186	1200	-
Flujo [mm]	2,933	3,136	3,679	3,806	3,026	2	4

\* Valores en rojo fuera de rango.

Tabla 38. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 10% vidrio.

### 3.3.2.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto es necesario seguir las recomendaciones propuestas por la NAPA.

De las gráficas se obtiene los valores requeridos por NAPA, mismo que se muestran en la Tabla 39 y se obtiene como resultado un porcentaje óptimo de 6.13% de asfalto para una mezcla asfáltica con 10% de contenido de vidrio triturado.

%Óptimo de Asfalto	
% Asfalto (Estabilidad)	6.1
% Asfalto (Densidad específica)	6.1
% Asfalto (Vacíos Totales)	6.0
<b>% Asfalto Promedio</b>	<b>6.13</b>

Tabla 39. Porcentaje Óptimo de Asfalto - Muestra con 10% de vidrio.

Los valores de los diferentes parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de betún de 6.13%, se obtienen de las ecuaciones de regresión presentes en la cada gráfica, en la Tabla 40 se presentan dichos parámetros.

<b>% Óptimo de Asfalto</b>	<b>6.13</b>
<b>%Va</b>	3.859
<b>%VMA</b>	17.125
<b>%VFA</b>	77.500
<b>Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.322
<b>Estabilidad [lb]</b>	5 830.134
<b>Flujo [mm]</b>	3.509

Tabla 40. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 10% vidrio.



### 3.3.3. Análisis de la mezcla asfáltica con 15% de vidrio

#### 3.3.3.1. Dosificación de la mezcla con 15% de vidrio

Se tiene 6 áridos: árido A (agregado 3/8), árido B (agregado 5/8), árido C (agregado 3/16), árido D (arena), árido E (vidrio) y árido F (cal hidratada); estos se combinan por el método del tanteo, asegurándonos que el árido E esté presente en la combinación con un 15%.

MEZCLA MODIFICADA CON 15% DE VIDRIO										
Tamiz	Tamiz mm	3/8"	5/8"	3/16"	ARENA	VIDRIO	CAL	Granulometría Combinada	Especificaciones	
		Árido A	Árido B	Árido C	Árido D	Árido E	Árido F		Lim. Inferior	Lim. Superior
		% Pasa								
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100.00	100.00
3/4"	19	100	99.74	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>99.89</b>	90.00	100.00
1/2"	12.5	99.96	52.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>80.32</b>	67.00	85.00
3/8"	9.5	99.84	28.85	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>70.83</b>	56.00	80.00
#4	4.75	11.5	0.00	96.59	85.46	95.11	100.00	<b>51.20</b>	35.00	65.00
#8	2.38	1.78	0.00	65.44	66.89	54.46	100.00	<b>36.54</b>	23.00	49.00
#10	2	1.19	0.00	58.01	62.17	48.09	100.00	<b>33.48</b>	20.00	45.00
#16	1.19	0.58	0.00	40.00	51.00	32.62	100.00	<b>26.15</b>	15.00	37.00
#30	0.59	0.16	0.00	35.00	30.00	18.78	100.00	<b>16.42</b>	8.00	26.00
#40	0.42	0	0.00	25.00	25.00	16.00	100.00	<b>13.65</b>	6.00	22.00
#50	0.297	0	0.00	21.00	22.00	13.00	62.28	<b>11.53</b>	5.00	19.00
#100	0.149	0	0.00	16.00	16.00	8.00	24.70	<b>8.01</b>	3.00	14.00
#200	0.074	0	0.00	7.00	10.00	3.00	11.30	<b>4.48</b>	2.00	8.00

Tabla 41. Dosificación de la mezcla con 15% vidrio.

En Tabla 41 y los Anexo 48 - Anexo 49 se detalla la combinación de los agregados y en la Tabla 42 se tiene los porcentajes resultantes de dicha combinación.

El árido B es el que más árido grueso aporta a la mezcla pues está presente con un 41% de su peso, los áridos con mayor aporte de finos son los que se han combinado con el 15% de vidrio de tal manera que la combinación es muy cercana a la media propuesta por las especificaciones técnicas de la NEVI-12, tal y como se puede observar en la Figura 81, además, la dosificación cumple con los requisitos de gradación para mezclas asfálticas densas mostradas en la Tabla 1 con graduación perteneciente al tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm.

% DE LA MEZCLA		
<b>2.00</b>	Árido A	3/8"
<b>41.00</b>	Árido B	5/8"
<b>6.00</b>	Árido C	3/16"
<b>35.00</b>	Árido D	ARENA
<b>15.00</b>	Árido E	VIDRIO
<b>1.00</b>	Árido F	CAL

Tabla 42. Porcentaje de combinación (15% vidrio).

### Combiación - 15% Vidrio

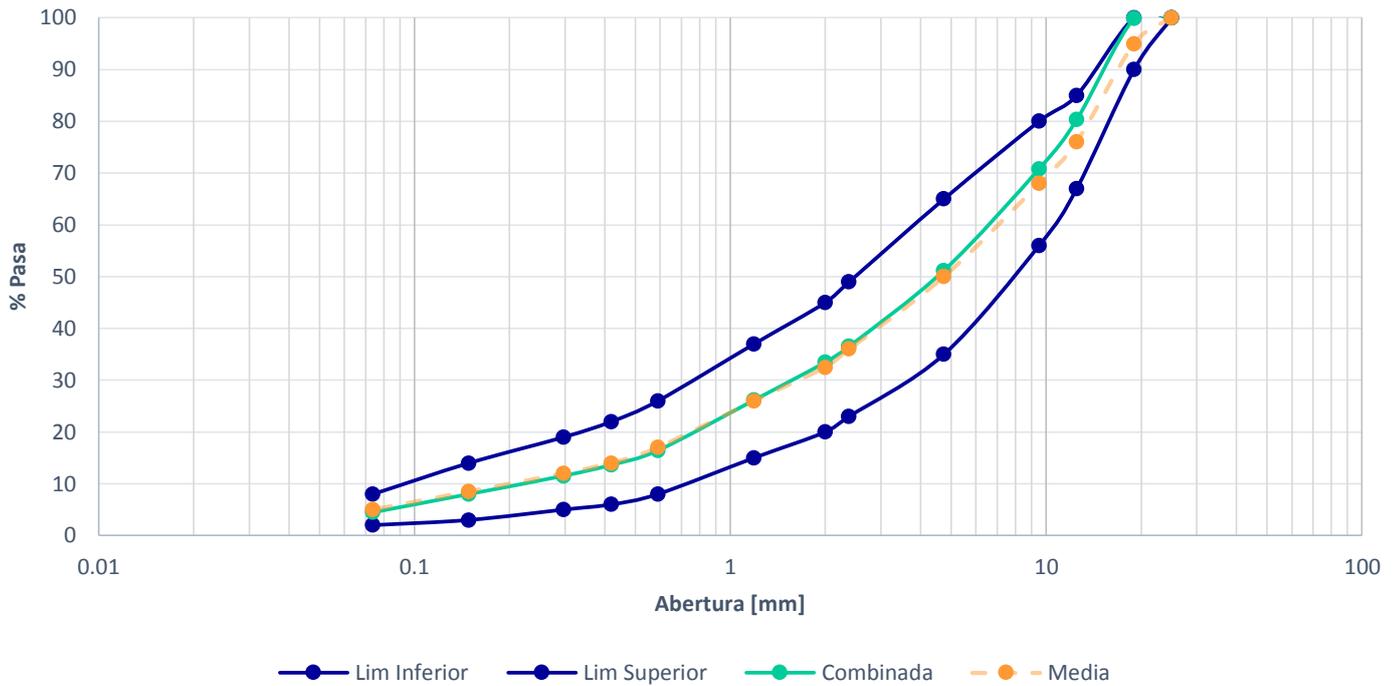


Figura 81. Combinación curva granulométrica (15% vidrio).

#### 3.3.3.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Se realizó el ensayo Rice usando el 6% de betún asfáltico, obteniendo el valor de 2.411 g/cm<sup>3</sup> de gravedad específica teórica máxima (Gmm). Luego este valor se usa para determinar Gmm con los distintos porcentajes de betún ensayados.

El detalle del cálculo se muestra a continuación en la Tabla 43.

Porcentaje de Asfalto	6.0%	
Porcentaje de vidrio	15% Vidrio	
A. Peso del Material [g.]	1500	1500
B. Peso Picnómetro + Agua [g.]	7251.7	7251.7
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [g.]	8130	8129
Peso Específico Máximo Muestra (Gmm) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.413	2.409
Promedio Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$ <b>2.411</b>	

Tabla 43. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (15% vidrio).



### 3.3.3.3. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados

Se realizaron 15 briquetas con 5 diferentes contenidos de betún (5, 5.5, 6, 6.5, 7%), para posteriormente ser ensayadas en el equipo Marshall.

En la Tabla 44 se presentan los resultados obtenidos y procesados del ensayo.; para el cálculo de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas asfáltica ( $V_a$ ,  $VMA$ ,  $VFA$ ) es necesario calcular la gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ ) y la gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ); en el primer cálculo intervienen las gravedades específicas secas de cada agregado incluida la del vidrio, el valor que se obtuvo es de  $2.586 \text{ g/cm}^3$  y el valor de  $G_{se}$  luego del cálculo fue de  $2.645 \text{ g/cm}^3$ .

En la Tabla 44 se puede ver que cada propiedad volumétrica de la mezcla asfáltica, estabilidad y flujo tienen 5 puntos promedios mismos que serán graficados para su posterior interpretación y se tiene:

- La Figura 82 tiene graficado el contenido de vacíos de aire ( $V_a$ ) vs el % de asfalto y se nota que el  $V_a$  disminuye conforme aumenta el porcentaje de betún, haciendo que la gráfica vaya decreciendo y tenga un valor mínimo de 2.185 con el 7% de betún.
- La Figura 83 grafica el peso específico ( $G_{mb}$ ) vs el % de asfalto y la gráfica resultante tiene una concavidad hacia abajo, teniendo un punto máximo con el 6 % de betún.
- En la Figura 84 se grafica la Estabilidad vs el % de asfalto y se observa que mientras incrementa el porcentaje de betún también lo hace la estabilidad, llegando a un punto máximo con el 6.3% de betún para luego empezar a decrecer.
- De la Figura 85 que grafica el porcentaje de vacíos llenos de asfalto ( $VFA$ ) vs el % de asfalto se puede decir que la tendencia del  $VFA$  es creciente conforme el contenido de asfalto incrementa, el valor máximo se tiene con 7% de betún.
- La Figura 86 grafica el porcentaje de vacíos en el agregado mineral ( $VMA$ ) vs el % de asfalto, la tendencia de la gráfica es creciente es decir que el  $VMA$  incrementa conforme el porcentaje de betún también lo hace, teniendo un máximo con 7% de betún.
- Finalmente, la Figura 87 grafica el Flujo vs el % de asfalto, en esta se puede ver que el valor del flujo aumenta con el porcentaje de betún hasta llegar a un punto máximo luego del cual decrece, el punto máximo se alcanza con el 6.3% de betún.



### ENSAYO MARSHALL - 15% VIDRIO

% Asfalto	5.00			5.50			6			6.5			7		
Nro. Briqueta	1.1	1.2	1.3	2.1	2.2	2.3	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	5.3
Peso Aire [g.]	1214.31	1215.64	1214.29	1211.01	1213.88	1211.78	1215.93	1214.60	1210.09	1211.48	1212.60	1213.54	1210.36	1212.38	1213.14
Peso SSS [g.]	1217.80	1218.10	1216.30	1213.00	1215.40	1213.20	1217.30	1216.50	1210.90	1211.60	1213.00	1213.70	1212.20	1213.20	1214.90
Peso Agua [g.]	694.10	694.40	695.20	693.60	694.90	693.00	692.40	696.40	691.30	693.30	693.20	691.20	693.90	691.30	690.60
Volumen [cm <sup>3</sup> ]	523.70	523.70	521.10	519.40	520.50	520.20	524.90	520.10	519.60	518.30	519.80	522.50	518.30	521.90	524.30
Gravedad Específica Neta [gr/cm <sup>3</sup> ]	2.319	2.321	2.330	2.332	2.332	2.329	2.316	2.335	2.329	2.337	2.333	2.323	2.335	2.323	2.314
Promedio Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2.323			2.331			2.327			2.331			2.324		
Gravedad Específica Teórica Máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	2.447			2.429			2.411			2.393			2.376		
% Vacíos Total (Va)	5.247	5.143	4.776	4.009	3.984	4.095	3.920	3.139	3.406	2.337	2.529	2.957	1.713	2.228	2.614
Promedio % Vacíos	5.055			4.029			3.488			2.608			2.185		
%Vacíos en el Agregado Mineral VMA	14.820	14.727	14.397	14.799	14.778	14.876	15.798	15.113	15.347	15.489	15.655	16.026	16.019	16.459	16.789
Promedio VMA [%]	14.648			14.818			15.419			15.724			16.422		
%Vacíos Llenos de Asfalto VFA	64.597	65.077	66.828	72.914	73.038	72.471	75.188	79.231	77.809	84.913	83.848	81.547	89.309	86.466	84.430
Promedio VFA [%]	65.500			72.808			77.409			83.436			86.735		
Flujo [mm]	3.295	3.822	2.933	3.921	3.707	3.295	3.822	3.756	3.509	3.311	3.921	3.295	3.526	3.46	3.938
Promedio Flujo [mm]	3.350			3.641			3.696			3.509			3.641		
Estabilidad Sin Corregir [lb]	5455.06	5560.33	5451.81	6361.63	6358.37	6768.19	6656.42	6383.21	6507.40	6246.61	6097.58	6544.65	6842.70	5861.63	6333.54
Factor Corrección	0.96	0.96	1	1	1	1	0.96	1	1	1	1	1	1	1	0.96
Estabilidad Corregida [lb]	5236.86	5337.91	5451.81	6361.63	6358.37	6768.19	6390.17	6383.21	6507.40	6246.61	6097.58	6544.65	6842.70	5861.63	6080.20
Promedio Estabilidad [lb]	5342.19			6496.06			6426.93			6296.28			6261.51		

Tabla 44. Resultados del ensayo Marshall (15% vidrio).



### % CONTENIDO DE VACÍOS

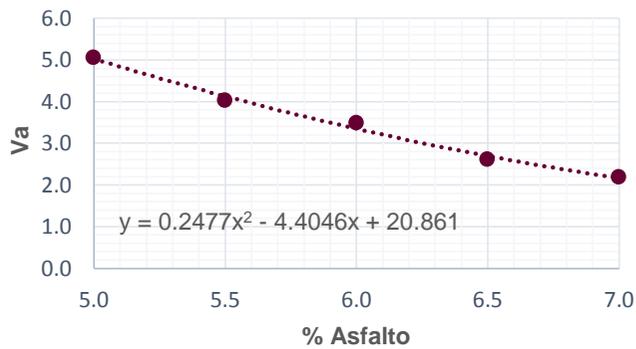


Figura 82. Contenido de vacíos (15% vidrio).

### PESO ESPECÍFICO

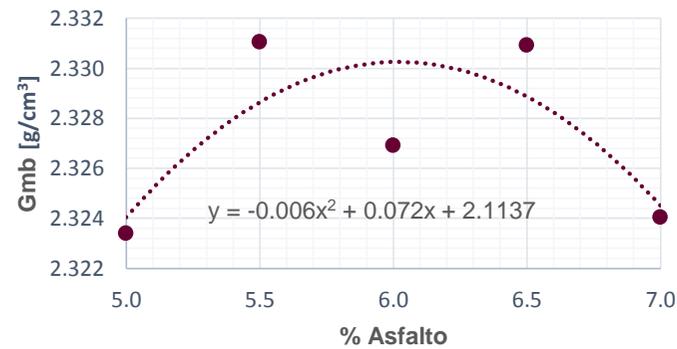


Figura 83. Peso específico (15% vidrio).

### ESTABILIDAD

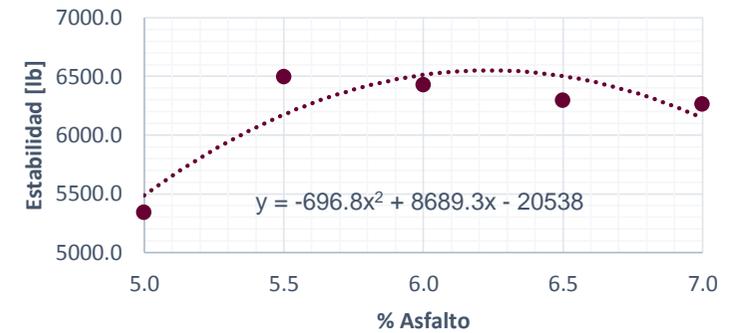


Figura 84. Estabilidad (15% vidrio).

### % VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

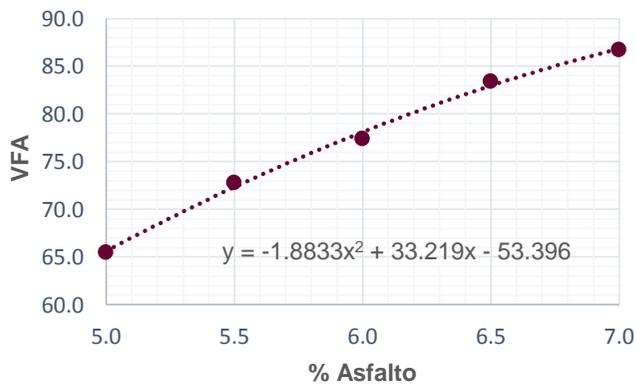


Figura 85. VFA (15% vidrio).

### % VACÍOS AGREGADO MINERAL

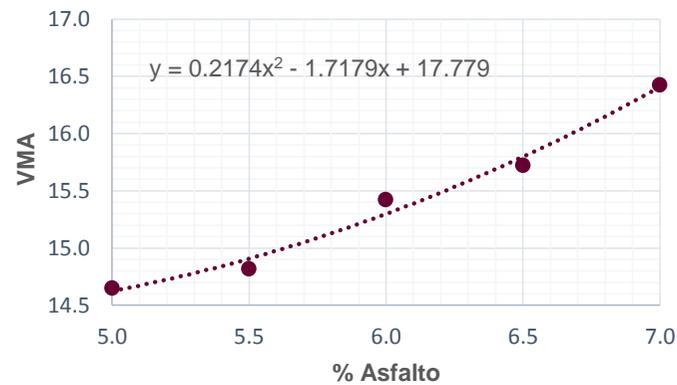


Figura 86. VMA (15% vidrio).

### FLUJO

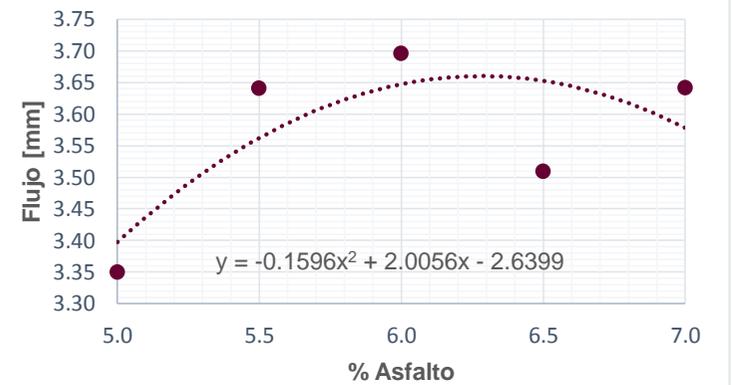


Figura 87. Flujo (15% vidrio).



En la Tabla 45 se muestra un resumen de los valores obtenidos en el ensayo Marshall, además de una columna con los rangos máximos y mínimos establecidos que debe cumplir una mezcla asfáltica para tráfico mediano.

Los valores que tienen el color rojo son aquellos que están fuera del rango y no cumplen con las especificaciones mínimas requeridas. Las únicas muestras que cumplen con todos los rangos son aquellas que contienen el 5.5 y 6.0 % de betún.

% Asfalto	Parámetros – 15% de vidrio					Rangos NAPA	
	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	MIN	MAX
%Va	5,055	4,029	3,488	2,608	2,185	3	5
%VMA	14,648	14,818	15,419	15,724	16,422	14	-
%VFA	65,500	72,808	77,409	83,436	86,735	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2,323	2,331	2,327	2,331	2,324	-	-
Estabilidad [lb]	5342,193	6329,397	6426,925	6296,280	6261,508	1200	-
Flujo [mm]	3,350	3,641	3,696	3,509	3,641	2	4

\* Valores en rojo fuera de rango.

Tabla 45. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 15% vidrio.

### 3.3.3.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto es necesario seguir las recomendaciones propuestas por la NAPA.

De las gráficas se obtiene los valores requeridos por NAPA, mismo que se muestran en la Tabla 46 y se obtiene como resultado un porcentaje óptimo de 5.93% de asfalto para una mezcla asfáltica con 15% de contenido de vidrio triturado.

%Óptimo de Asfalto	
% Asfalto (Estabilidad)	6.3
% Asfalto (Densidad específica)	6.0
% Asfalto (Vacíos Totales)	5.5
<b>% Asfalto Promedio</b>	<b>5.93</b>

Tabla 46. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 15% de vidrio.

Los valores de los diferentes parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de betún de 5.93%, se obtienen de las ecuaciones de regresión presentes en cada gráfica, en la Tabla 47 se presentan estos parámetros.

<b>%Óptimo de Asfalto</b>	<b>5.93</b>
<b>%Va</b>	3.56
<b>%VMA</b>	15.34
<b>%VFA</b>	76.77
<b>Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.33
<b>Estabilidad [lb]</b>	6 413.27
<b>Flujo [mm]</b>	3.69

Tabla 47. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 15% vidrio.



### 3.3.4. Análisis de la mezcla asfáltica con 20% de vidrio

#### 3.3.4.1. Dosificación de la mezcla con 20% de vidrio

Se tiene 6 áridos: árido A (agregado 3/8), árido B (agregado 5/8), árido C (agregado 3/16), árido D (arena), árido E (vidrio) y árido F (cal hidratada); estos se combinan por el método del tanteo, asegurándonos que el árido E esté presente en la combinación con un 20%.

MEZCLA MODIFICADA CON 20% DE VIDRIO										
Tamiz	Tamiz mm	3/8"	5/8"	3/16"	ARENA	VIDRIO	CAL	Granulometría Combinada	Especificaciones	
		Árido A	Árido B	Árido C	Árido D	Árido E	Árido F		Lim. Inferior	Lim. Superior
		% Pasa								
1"	25	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>100.00</b>	100.00	100.00
3/4"	19	100	99.74	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>99.89</b>	90.00	100.00
1/2"	12.5	99.96	52.00	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>80.32</b>	67.00	85.00
3/8"	9.5	99.84	28.85	100.00	100.00	100.00	100.00	<b>70.83</b>	56.00	80.00
#4	4.75	11.5	0.00	96.59	85.46	95.11	100.00	<b>52.31</b>	35.00	65.00
#8	2.38	1.78	0.00	65.44	66.89	54.46	100.00	<b>36.59</b>	23.00	49.00
#10	2	1.19	0.00	58.01	62.17	48.09	100.00	<b>33.42</b>	20.00	45.00
#16	1.19	0.58	0.00	40.00	51.00	32.62	100.00	<b>25.85</b>	15.00	37.00
#30	0.59	0.16	0.00	35.00	30.00	18.78	100.00	<b>16.11</b>	8.00	26.00
#40	0.42	0	0.00	25.00	25.00	16.00	100.00	<b>13.45</b>	6.00	22.00
#50	0.297	0	0.00	21.00	22.00	13.00	62.28	<b>11.31</b>	5.00	19.00
#100	0.149	0	0.00	16.00	16.00	8.00	24.70	<b>7.77</b>	3.00	14.00
#200	0.074	0	0.00	7.00	10.00	3.00	11.30	<b>4.26</b>	2.00	8.00

Tabla 48. Dosificación de la mezcla con 20% vidrio.

En Tabla 48 y en los Anexo 50 - Anexo 51 se detalla la combinación de los agregados y en la Tabla 49 se tiene los porcentajes resultantes de dicha combinación.

El árido B es el que más aporta árido grueso a la mezcla y está presente con un 41% de su peso, los áridos con mayor aporte de finos son los que se han combinado con el 20% de vidrio de tal manera que la combinación es muy cercana a la media propuesta por las especificaciones técnicas de la NEVI-12, tal y como se puede observar en la Figura 88, además, la dosificación cumple con los requisitos de gradación para mezclas asfálticas densas mostradas en la Tabla 1 con graduación perteneciente al tamaño máximo nominal del agregado de 19 mm.

% DE LA MEZCLA		
<b>1.00</b>	Árido A	3/8
<b>41.00</b>	Árido B	5/8
<b>5.00</b>	Árido C	3/16
<b>32.00</b>	Árido D	ARENA
<b>20.00</b>	Árido E	VIDRIO
<b>1.00</b>	Árido F	CAL

Tabla 49. Porcentaje de combinación (20% vidrio).

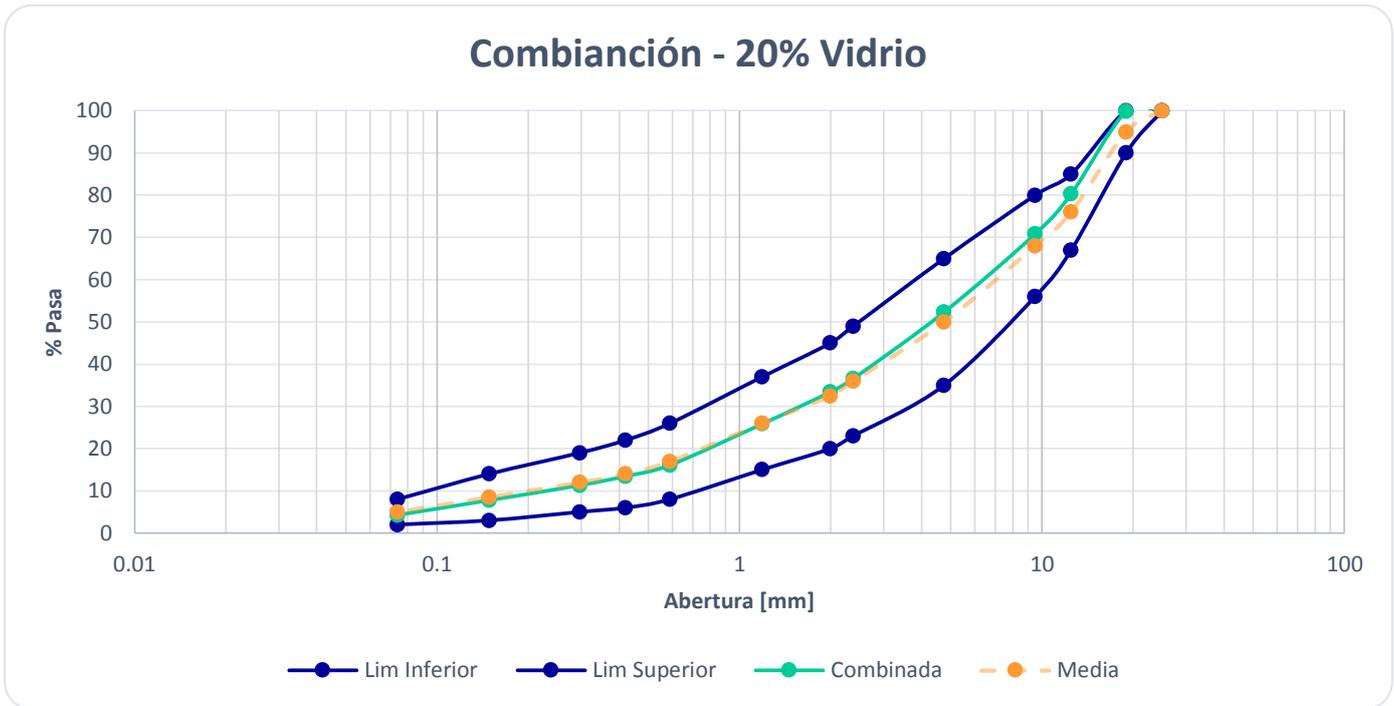


Figura 88. Combinación curva granulométrica (20% vidrio).

### 3.3.4.2. Gravedad específica máxima teórica (Gmm)

Se realizó el ensayo Rice usando el 6% de betún asfáltico, obteniendo el valor de 2.410 g/cm<sup>3</sup> de gravedad específica teórica máxima (Gmm). Luego este valor se usa para determinar Gmm con los distintos porcentajes de betún ensayados.

En la Tabla 50 se muestra el detalle del cálculo usado para encontrar el valor de la gravedad específica teórica máxima.

Porcentaje de Asfalto	6.0%	
Porcentaje de vidrio	20% Vidrio	
A. Peso del Material [g.]	1500	1500
B. Peso Picnómetro + Agua [g.]	7251.7	7253.2
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [g.]	8131	8129
Peso Específico Máximo Muestra (Gmm) [g/cm <sup>3</sup> ]	2.417	2.403
Promedio Gmm [g/cm <sup>3</sup> ]	$Gmm = \frac{A}{A + B - C}$	
	<b>2.410</b>	

Tabla 50. Cálculo de la gravedad específica teórica máxima (20% vidrio).



### 3.3.4.3. Ensayo de estabilidad y fluencia Marshall con sus respectivos resultados

Se realizaron 15 briquetas con 5 diferentes contenidos de betún (5, 5.5, 6, 6.5, 7%), para posteriormente ser ensayadas en el equipo Marshall.

En la Tabla 51 se presentan los resultados obtenidos y procesados del ensayo; para el cálculo de las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas asfáltica ( $V_a$ ,  $VMA$ ,  $VFA$ ) es necesario calcular la gravedad específica neta del agregado ( $G_{sb}$ ) y la gravedad específica efectiva del agregado ( $G_{se}$ ); en el primer cálculo intervienen las gravedades específicas secas de cada agregado incluida la del vidrio, el valor que se obtuvo es de  $2.543 \text{ g/cm}^3$  y el valor de  $G_{se}$  luego del cálculo fue de  $2.644 \text{ g/cm}^3$ .

En la Tabla 51 se puede ver que cada propiedad volumétrica de la mezcla asfáltica, estabilidad y flujo tienen 5 puntos promedios mismos que serán graficados para su posterior interpretación y se tiene:

- La Figura 89 tiene graficado el contenido de vacíos de aire ( $V_a$ ) vs el % de asfalto y se nota que el  $V_a$  disminuye conforme aumenta el porcentaje de betún, haciendo que la gráfica vaya decreciendo y tenga un valor mínimo de 1.878 con el 7% de betún.
- La Figura 90 grafica el peso específico ( $G_{mb}$ ) vs el % de asfalto y la gráfica resultante tiene una concavidad hacia abajo, teniendo un punto máximo con el 6.2 % de betún.
- En la Figura 91 se grafica la Estabilidad vs el % de asfalto y se observa que mientras incrementa el porcentaje de betún también lo hace la estabilidad, hasta llegar a un punto máximo con el 6% de betún, para luego empezar a decrecer.
- De la Figura 92 que grafica el porcentaje de vacíos llenos de asfalto ( $VFA$ ) vs el % de asfalto se puede decir que la tendencia del  $VFA$  es creciente conforme el contenido de asfalto incrementa, el valor máximo se tiene con 7% de betún.
- La Figura 93 grafica el porcentaje de vacíos en el agregado mineral ( $VMA$ ) vs el % de asfalto, la tendencia de la gráfica es creciente es decir que el  $VMA$  incrementa conforme el porcentaje de betún también lo hace, teniendo un máximo con 7% de betún.
- Finalmente, la Figura 94 grafica el Flujo vs el % de asfalto, en esta se puede ver que el valor del flujo aumenta con el porcentaje de betún, el valor máximo se alcanza con el 7% de betún.



<b>ENSAYO MARSHALL - 20% VIDRIO</b>															
<b>% Asfalto</b>	<b>5.00</b>			<b>5.50</b>			<b>6</b>			<b>6.5</b>			<b>7</b>		
<b>Nro. Briqueta</b>	<b>1.1</b>	<b>1.2</b>	<b>1.3</b>	<b>2.1</b>	<b>2.2</b>	<b>2.3</b>	<b>3.1</b>	<b>3.2</b>	<b>3.3</b>	<b>4.1</b>	<b>4.2</b>	<b>4.3</b>	<b>5.1</b>	<b>5.2</b>	<b>5.3</b>
<b>Peso Aire [g.]</b>	1211.47	1213.47	1215.70	1211.86	1213.19	1214.70	1211.02	1211.19	1212.48	1211.51	1213.52	1214.91	1211.80	1213.70	1211.27
<b>Peso SSS [g.]</b>	1213.30	1216.40	1216.30	1212.40	1214.80	1215.50	1211.60	1213.40	1213.10	1212.00	1213.80	1215.30	1212.10	1213.70	1212.60
<b>Peso Agua [g.]</b>	692.30	693.30	694.00	692.70	691.70	694.30	694.60	694.50	694.90	693.80	694.50	690.30	692.30	691.70	693.80
<b>Volumen [cm<sup>3</sup>]</b>	521.00	523.10	522.30	519.70	523.10	521.20	517.00	518.90	518.20	518.20	519.30	525.00	519.80	522.00	518.80
<b>Gravedad Específica Neta [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.325	2.320	2.328	2.332	2.319	2.331	2.342	2.334	2.340	2.338	2.337	2.314	2.331	2.325	2.335
<b>Promedio Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>2.324</b>			<b>2.327</b>			<b>2.339</b>			<b>2.330</b>			<b>2.330</b>		
<b>Gravedad Específica Teórica Máxima [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>2.446</b>			<b>2.428</b>			<b>2.410</b>			<b>2.392</b>			<b>2.375</b>		
<b>% Vacíos Total (Va)</b>	4.938	5.164	4.844	3.956	4.476	4.008	2.805	3.147	2.913	2.276	2.321	3.271	1.840	2.100	1.694
<b>Promedio % Vacíos</b>	<b>4.982</b>			<b>4.147</b>			<b>2.955</b>			<b>2.622</b>			<b>1.878</b>		
<b>%Vacíos en el Agregado Mineral VMA</b>	13.149	13.355	13.062	13.362	13.831	13.409	13.430	13.735	13.527	14.055	14.095	14.930	14.758	14.984	14.631
<b>Promedio VMA [%]</b>	<b>13.189</b>			<b>13.534</b>			<b>13.564</b>			<b>14.360</b>			<b>14.791</b>		
<b>%Vacíos Llenos de Asfalto VFA</b>	62.444	61.335	62.919	70.391	67.638	70.107	79.114	77.085	78.463	83.810	83.534	78.094	87.533	85.983	88.424
<b>Promedio VFA [%]</b>	<b>62.233</b>			<b>69.378</b>			<b>78.221</b>			<b>81.813</b>			<b>87.313</b>		
<b>Flujo [mm]</b>	2.933	3.493	2.521	2.834	3.279	2.867	3.114	2.62	3.229	3.196	3.311	3.048	3.262	3.328	2.998
<b>Promedio Flujo [mm]</b>	<b>2.982</b>			<b>2.993</b>			<b>2.988</b>			<b>3.185</b>			<b>3.196</b>		
<b>Estabilidad Sin Corregir [lb]</b>	6085.16	6743.35	6532.24	6842.70	7389.13	6892.38	7314.61	6942.05	6656.42	6519.82	6631.59	7053.82	6115.92	6277.36	6805.45
<b>Factor Corrección</b>	1	0.96	1	1	0.96	1	1	1	1	1	1	0.96	1	1	1
<b>Estabilidad Corregida [lb]</b>	6085.16	6473.62	6532.24	6842.70	7093.56	6892.38	7314.61	6942.05	6656.42	6519.82	6631.59	6771.67	6115.92	6277.36	6805.45
<b>Promedio Estabilidad [lb]</b>	<b>6363.67</b>			<b>6942.88</b>			<b>6971.03</b>			<b>6641.02</b>			<b>6399.57</b>		

Tabla 51. Resultados del ensayo Marshall (20% vidrio).



### % CONTENIDO DE VACÍOS

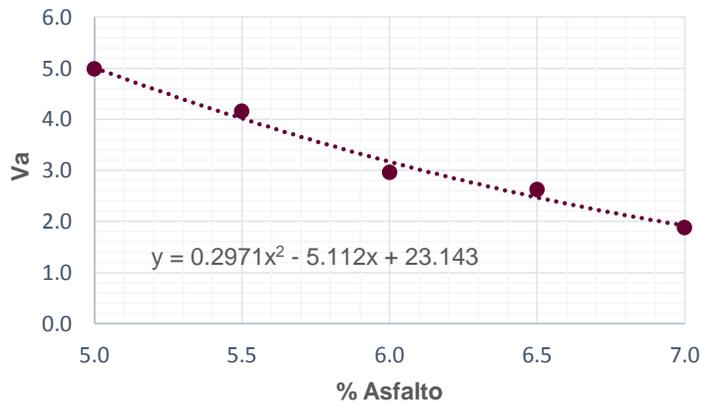


Figura 89. Contenido de vacíos (20% vidrio).

### PESO ESPECÍFICO

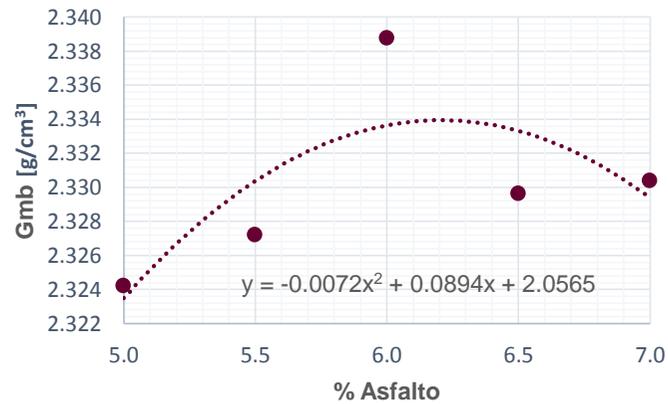


Figura 90. Peso específico (20% vidrio).

### ESTABILIDAD

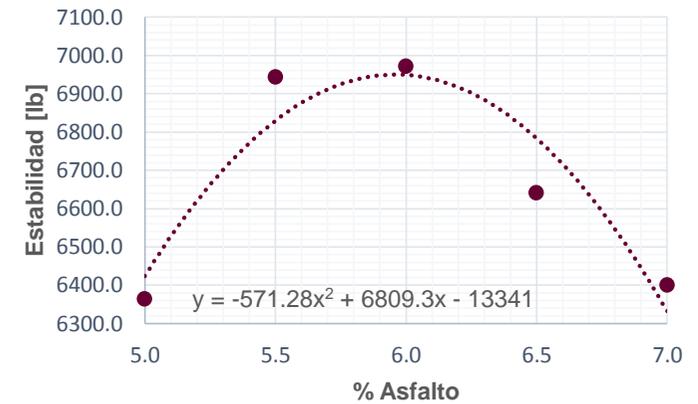


Figura 91. Estabilidad (20% vidrio).

### % VACÍOS LLENOS DE ASFALTO

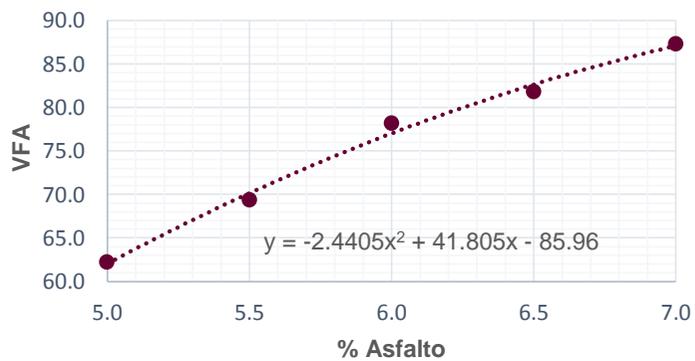


Figura 92. VFA (20% vidrio).

### % VACÍOS AGREGADO MINERAL

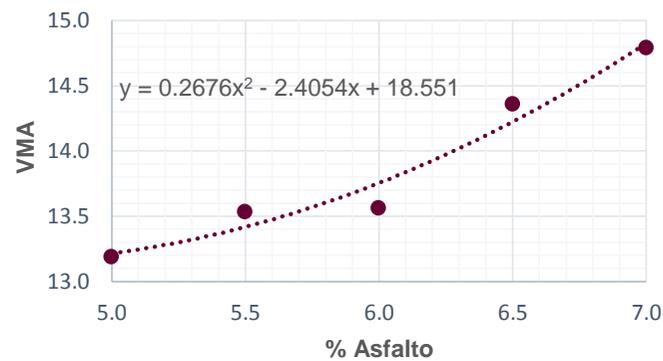


Figura 93. VMA (20% vidrio).

### FLUJO

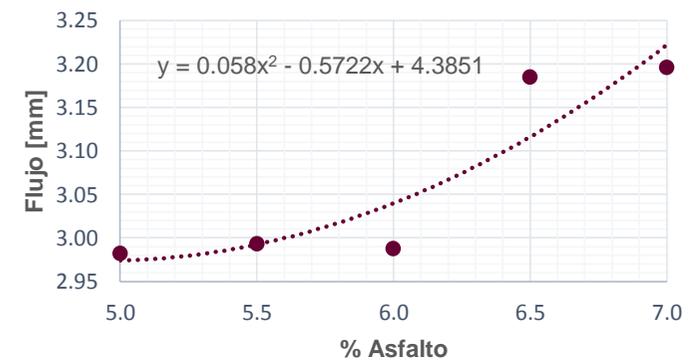


Figura 94. Flujo (20% vidrio).



En la Tabla 52 se muestra un resumen de los valores obtenidos en el ensayo Marshall, además de una columna con los rangos máximos y mínimos establecidos que debe cumplir una mezcla asfáltica para tráfico mediano.

Los valores que tienen el color rojo son aquellos que están fuera del rango y no cumplen con las especificaciones mínimas requeridas, en este caso ninguna muestra cumple con las especificaciones pues están fuera de los rangos.

Parámetros – 20% de vidrio						Rangos NAPA	
% Asfalto	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	MIN	MAX
%Va	4,982	4,147	2,955	2,622	1,878	3	5
%VMA	13,189	13,534	13,564	14,360	14,791	14	-
%VFA	62,233	69,378	78,221	81,813	87,313	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2,324	2,327	2,339	2,330	2,330	-	-
Estabilidad [lb]	6363,673	6942,881	6971,030	6641,023	6399,573	1200	-
Flujo [mm]	2,982	2,993	2,988	3,185	3,196	2	4

\* Valores en rojo fuera de rango.

Tabla 52. Resumen de los resultados de la mezcla asfáltica modificada con 20% vidrio.

### 3.3.4.4. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto.

Para poder determinar el porcentaje óptimo de asfalto es necesario seguir las recomendaciones propuestas por la NAPA.

De las gráficas se obtiene los valores requeridos por NAPA, mismo que se muestran en la Tabla 53 y se obtiene como resultado un porcentaje óptimo de 5.90% de asfalto para una mezcla asfáltica con 20% de contenido de vidrio triturado.

%Óptimo de Asfalto	
% Asfalto (Estabilidad)	6.0
% Asfalto (Densidad específica)	6.2
% Asfalto (Vacíos Totales)	5.5
<b>% Asfalto Promedio</b>	<b>5.90</b>

Tabla 53. Porcentaje óptimo de asfalto - Muestra con 20% de vidrio.

Los valores de los diferentes parámetros Marshall para el porcentaje óptimo de betún de 5.90%, se obtienen de las ecuaciones de regresión presentes en cada gráfica, en la Tabla 54 se presentan estos parámetros.

<b>%Óptimo de Asfalto</b>	<b>5.90</b>
<b>%Va</b>	3.193
<b>%VMA</b>	13.558
<b>%VFA</b>	76.452
<b>Gmb [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.337
<b>Estabilidad [lb]</b>	6 701.395
<b>Flujo [mm]</b>	2.989

Tabla 54. Porcentaje Resultados de los parámetros con el porcentaje óptimo – 20% vidrio.



### 3.4. Análisis de los resultados entre la mezcla asfáltica patrón y las mezclas asfálticas modificadas con vidrio.

Luego de haber determinado los porcentajes óptimos de betún tanto de la mezcla asfáltica patrón como de las mezclas modificadas con vidrio, se realiza una tabla con los valores resumen de los diseños Marshall correspondientes a cada porcentaje óptimo de asfalto; obteniendo así la Tabla 55 en donde se visualiza como influyó el vidrio en los resultados.

Resumen de los resultados óptimos						RANGOS NAPA	
Mezcla Asfáltica	Patrón	5% de Vidrio	10% de Vidrio	15% de Vidrio	20% de Vidrio	MIN	MAX
% Optimo de Asfalto	6.50	6.33	6.13	5.93	5.90	-	-
%Va	4.410	3.886	3.859	3.564	3.193	3	5
%VMA	20.025	18.539	17.125	15.335	13.558	14	
%VFA	77.981	79.040	77.500	76.765	76.452	65	78
Gmb [g/cm <sup>3</sup> ]	2.331	2.327	2.322	2.326	2.337	-	-
Estabilidad [lb]	6327.227	5594.422	5830.134	6413.271	6701.395	1200	-
Flujo [mm]	3.613	4.093	3.509	3.688	2.989	2	4

\* Valores en rojo fuera de rango.

Tabla 55. Resumen de los resultados óptimos.

Se marcó con rojo aquellos valores que no cumplen con las especificaciones y se tiene que la mezcla asfáltica con 20% de contenido de vidrio no cumple con el rango mínimo del porcentaje de vacío mineral lleno de asfalto pues tiene un valor inferior a 14%, al igual que la mezcla asfáltica con 5% de contenido de vidrio no cumple con el rango máximo del porcentaje de vacíos llenos de asfalto pues tiene un valor superior a 78%.

En la Figura 95 se grafica el porcentaje óptimo de betún vs el porcentaje de vidrio adicionado, en donde el porcentaje óptimo de betún de la mezcla asfáltica patrón es de 6.5% y conforme a la mezcla se le va adicionando vidrio este porcentaje disminuye hasta llegar un valor de 5.90 correspondiente al 20% de contenido de vidrio.

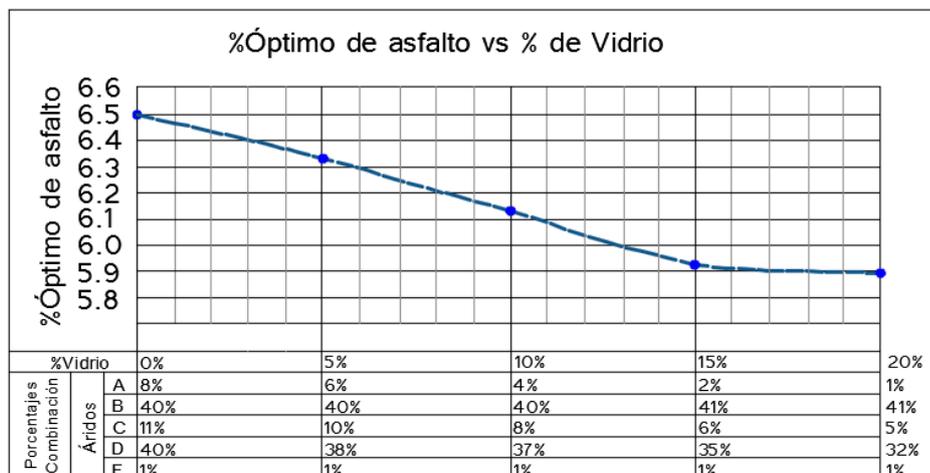


Figura 95. %Óptimo de asfalto vs % vidrio.



La Figura 96. Va vs % de Vidrio., Figura 97. VMA vs % de Vidrio., Figura 98. VFA vs % de Vidrio., muestra los parámetros Va, VMA y VFA., en donde la mezcla asfáltica patrón tiene valores ligeramente mayores que en las mezclas modificadas con vidrio, pues en ellas se nota que mientras se incrementa el porcentaje de vidrio los diferentes parámetros van disminuyendo.

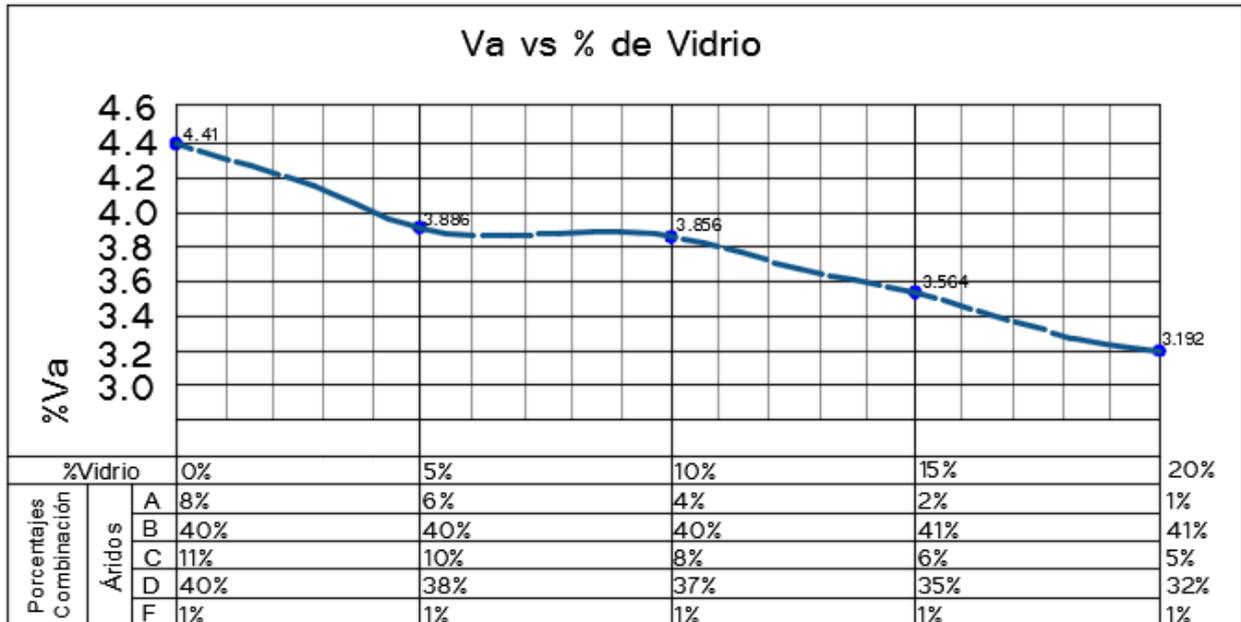


Figura 96. Va vs % de Vidrio.

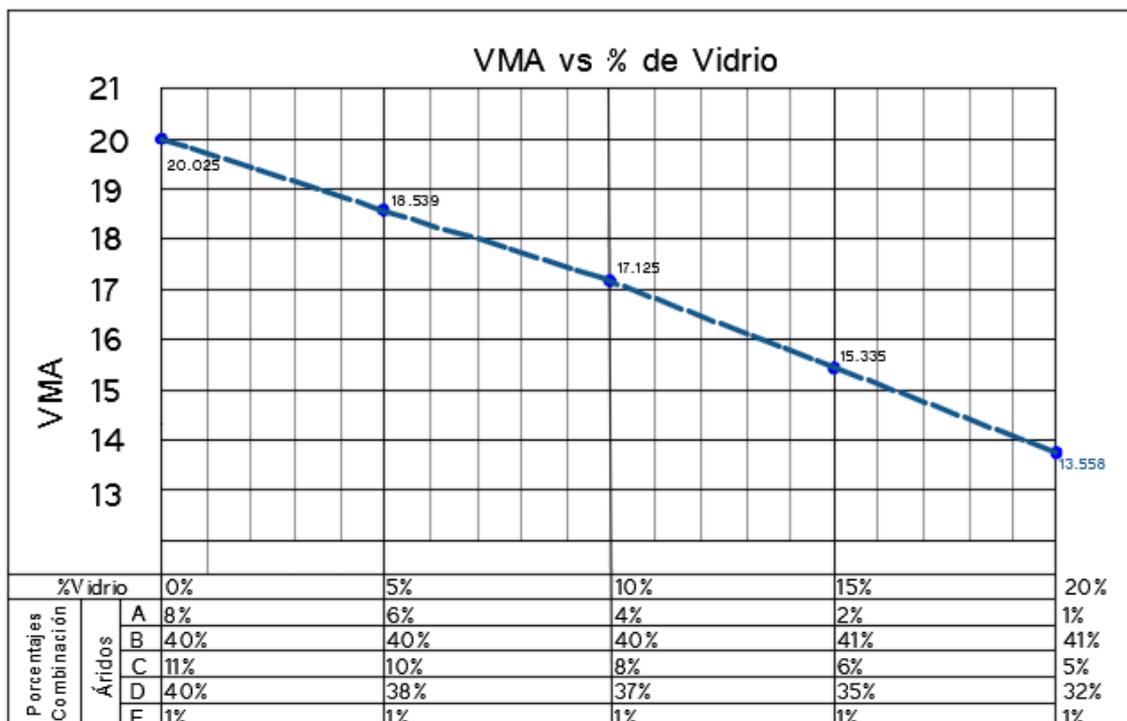


Figura 97. VMA vs % de Vidrio.

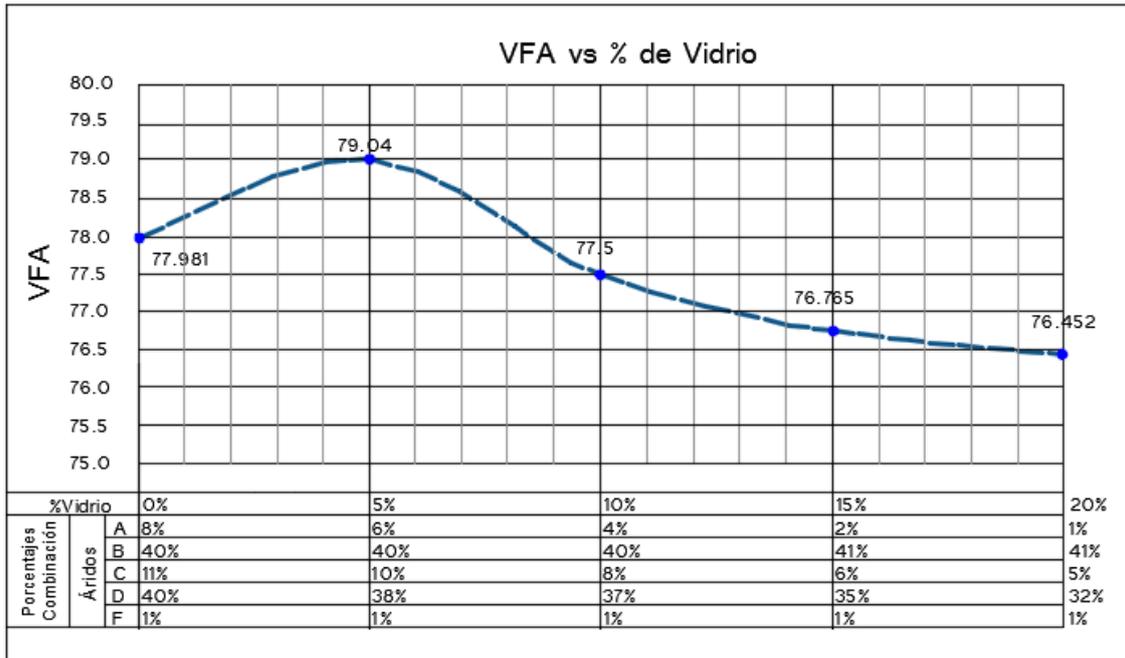


Figura 98. VFA vs % de Vidrio.

La Figura 99 se observa que los pesos específicos comparados con la mezcla asfáltica patrón son ligeramente menores, sin embargo, entre las mezclas asfálticas modificadas con vidrio se presenta una concavidad hacia abajo, en donde se tiene un valor mínimo de densidad y luego de esta crece nuevamente.

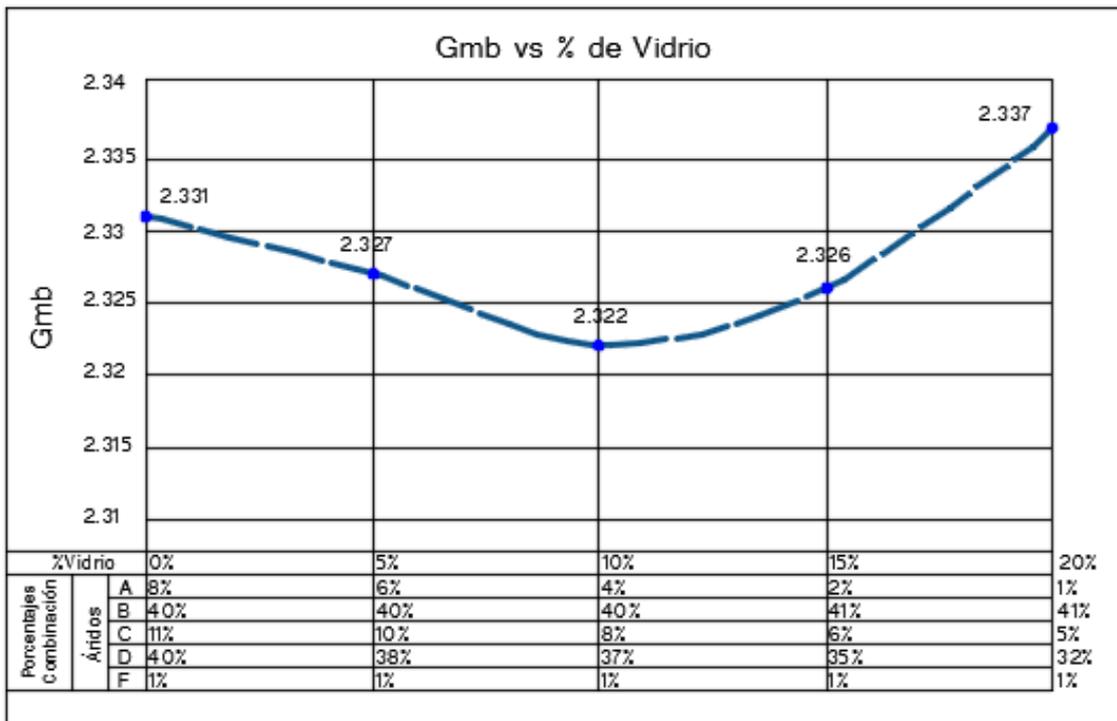


Figura 99. Peso específico (Gmb) vs % de vidrio.

En la Figura 100, se nota que valores de estabilidad van en aumento conforme se adiciona vidrio a la mezcla, teniendo así que con el 15% de vidrio se tiene un valor de 6413.27 lb y con el 20% de vidrio un valor de 6701.40 lb, estos valores son superiores al de la mezcla asfáltica patrón mismo que tiene un valor de 6327.23 lb.

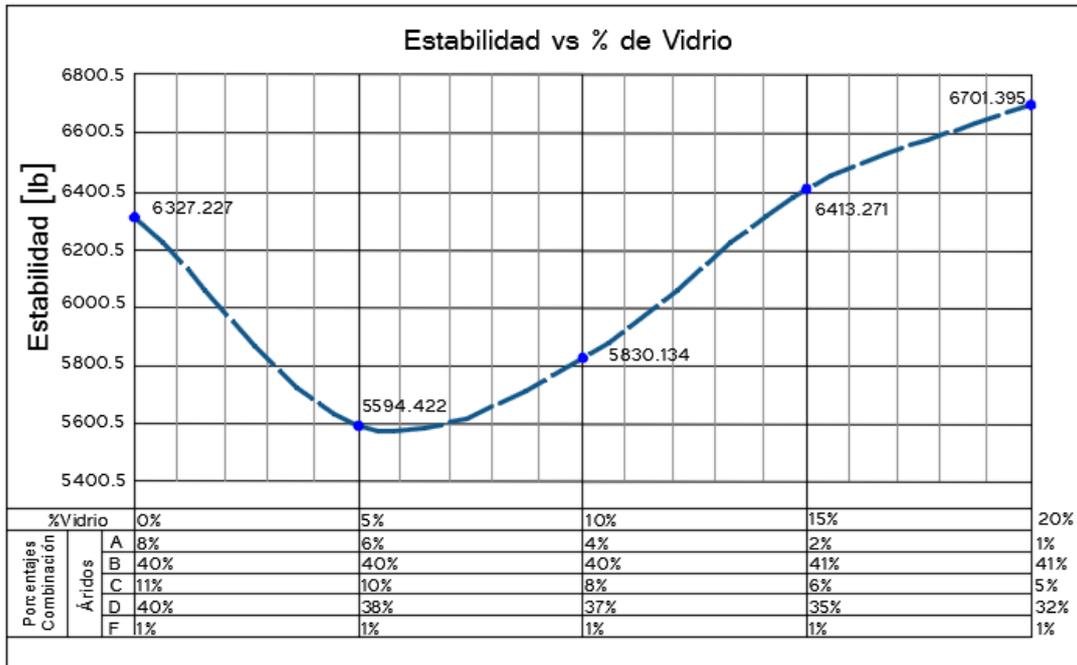


Figura 100. Estabilidad vs % de vidrio.

Finalmente, la Figura 101, muestra que a pesar que el valor del flujo tanto de la mezcla patrón y las modificadas con vidrio están dentro del rango, el valor de flujo va disminuyendo con el incremento en la adición de vidrio y las mezclas que contienen 10,15 y 20 % de vidrio tienen valores menores a la obtenida en la mezcla asfáltica patrón.

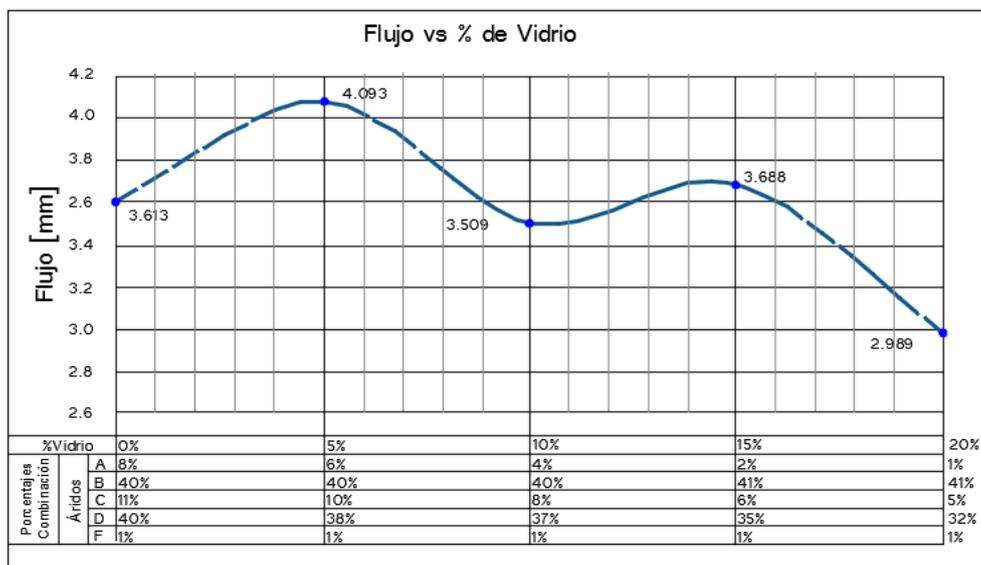


Figura 101. Flujo vs % vidrio.

### 3.5. Resultados del ensayo de abrasión

Se desarrolló el ensayo de cántabro de pérdida por desgaste a la mezcla asfáltica convencional y modificada con vidrio triturado con el fin de valorar empíricamente la resistencia a la disgregación de la mezcla, las cuales fueron elaboradas con el resultado del porcentaje óptimo de asfalto obtenido del ensayo Marshall.

A través de la Figura 102 y Tabla 56 se muestra los resultados del ensayo de abrasión y se puede identificar que mientras mayor cantidad de vidrio contenga la mezcla asfáltica, menor porcentaje de desgaste se produce. Es así que cuando la mezcla asfáltica no contiene vidrio, se tiene 1.76% de abrasión; pero conforme se aumenta el porcentaje de vidrio en este caso un 20%, el porcentaje de abrasión disminuye al 0.20% de abrasión.

Resultados del Ensayo de Abrasión		
Porcentaje Vidrio	Porcentaje Óptimo Asfalto	% Abrasión
0	6.50	1.76
5	6.33	0.98
10	6.13	0.41
15	5.93	0.32
20	5.90	0.20

Tabla 56. Resumen del Ensayo de Abrasión.

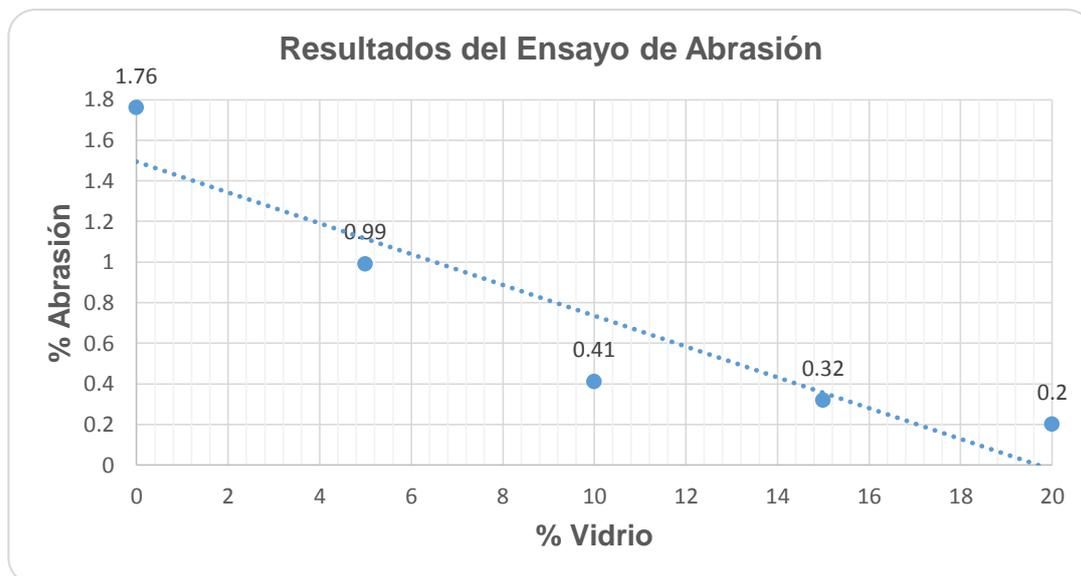


Figura 102. Resultados del Ensayo de Abrasión, %Vidrio vs %Abrasión.

En la Figura 103 (Muestra patrón), Figura 104 (Muestra 5% vidrio), Figura 105 (Muestra 10% vidrio), Figura 106 (Muestra 15 vidrio) y Figura 107 (Muestra 20% vidrio) se evidencia el desgaste en las briquetas diseñadas con los diferentes porcentajes de vidrio, luego de ser sometidas al ensayo en la máquina de Los Ángeles.



*Figura 103. Muestra Patrón luego del ensayo de abrasión.*



*Figura 104. Muestra 5% vidrio luego del ensayo de abrasión.*



Figura 105. Muestra 10% vidrio luego del ensayo de abrasión.



Figura 106. Muestra 15% vidrio luego del ensayo de abrasión.



Figura 107. Muestra 20% vidrio luego del ensayo de abrasión.

### 3.6. Resultados del ensayo de adherencia

A través de la norma ASTM D 3625 – 96: “Práctica estándar para el efecto del agua en áridos con revestimiento bituminoso utilizando agua hirviendo”, se determinó de forma visual la adherencia en las mezclas asfálticas, este ensayo tiene la característica de ser utilizado comúnmente en campo sometiendo a las mezclas sueltas la acción acelerada del agua hirviendo.

El efecto del agua sobre las mezclas asfálticas no representó una pérdida significativa en ninguna de las muestras ensayadas con diferentes porcentajes óptimos de betún, obteniéndose así visualmente una adherencia superior al 95%, como se observa en la Figura 108 (Adherencia con muestra patrón), Figura 109 (Adherencia con 5% de vidrio), Figura 110 (Adherencia con 10% de vidrio), Figura 111 (Adherencia con 15% de vidrio), Figura 112 (Adherencia con 20% de vidrio).

En la Tabla 57 se encuentran los resultados del ensayo de adherencia efectuados a las mezclas asfálticas, las cuales fueron ensayadas a diferentes porcentajes de vidrio y con sus respectivos porcentajes óptimos de asfalto.

Resultados Ensayo Adherencia		
Porcentaje Vidrio	Porcentaje Óptimo de Asfalto	Adherencia
0	6.50	Mayor al 95%
5	6.33	Mayor al 95%
10	6.13	Mayor al 95%
15	5.93	Mayor al 95%
20	5.90	Mayor al 95%

Tabla 57. Resultados del ensayo de adherencia.



Figura 108. Adherencia con muestra patrón.



*Figura 109. Adherencia con 5% vidrio.*



*Figura 110. Adherencia con 10% vidrio.*



*Figura 111. Adherencia con 15% vidrio.*



*Figura 112. Adherencia con 20% vidrio.*



### **3.7. Determinación del porcentaje óptimo de vidrio triturado**

En general luego del análisis entre las mezclas asfálticas patrón y las mezclas asfálticas modificadas con vidrio, se puede decir que la incorporación del vidrio a la mezcla es beneficioso pues le ofrece mayores valores de estabilidad y menores valores en flujo y demás propiedades volumétricas; sin embargo, las mezclas asfálticas con 10 y 15% de vidrio son las que cumplen con todas las especificaciones mínimas requeridas y de entre estas dos, la mezcla asfáltica con 15% de vidrio es la que ofrece un mayor valor de estabilidad por lo cual se escoge como el porcentaje óptimo de vidrio triturado que hay que adicionarle a la mezcla asfáltica.

### **3.8. Análisis de precios unitarios**

El análisis de precios unitarios “APU”, consiste en realizar un análisis de costos del pavimento convencional y del modificado con el porcentaje óptimo de vidrio y determinar el costo - beneficio que resulta de la adición de vidrio a la mezcla asfáltica.

El análisis APU incluye los resultados obtenidos en el ensayo Marshall como son el porcentaje óptimo de betún para la mezcla patrón (6.5%) y la mezcla asfáltica modificada con el 15% de vidrio (5.93%), los mismos que se usaron para determinar las cantidades dentro de los rubros de materiales.

Se realizó el análisis de precios unitarios para la producción de asfalto dentro de la planta asfáltica, ya sea para la elaboración de un asfalto convencional y uno modificado con 15% de vidrio. Dentro de este análisis se consideró la intervención de equipos y herramientas, materiales y mano de obra.

Por otra parte, el precio propuesto para cada rubro, especialmente los salarios mínimos, se obtuvieron de la lista de precios expuestos por la Contraloría General del Estado del año 2020. Sin embargo, el precio del betún asfáltico AC-20 y de los áridos (5/8, 3/8, 3/16 y arena) fue otorgado por la empresa ASFALTAR EP y para el precio del vidrio se consideró usar el valor de \$44.24 el metro cúbico (Cruz Salgado & Rosales Gavilanez, 2018).

Finalmente, la producción de asfalto por metro cúbico para un pavimento convencional resultó tener un costo de 141.91 USD y para un pavimento modificado con 15% de vidrio el costo es de 144.18 USD; este análisis de costos se encuentra detallado en la Tabla 58 y Tabla 59, respectivamente.



UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERIA: ESCUELA DE INGENIERA CIVIL				 <b>Fundada en 1867</b> <b>UNIVERSIDAD DE CUENCA</b>		
ANALISIS DE PRECION UNITARIOS: ASFALTO CONVENCIONAL PRODUCIDO EN LA PLANTA DE ASFALTO						
Equipos y Herramientas						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A0001	Planta de Asfalto	Hora	1	125	0.5	62.50
A0002	Cargador Frontal	Hora	1	35	0.5	17.50
A0003	Volqueta	Hora	1	30	0.5	15.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						95.00
Materiales						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B0001	Árido 5/8	m3	0.38	16.5		6.20
B0002	Árido 3/8	m3	0.08	16.15		1.21
B0003	Árido 3/16	m3	0.10	16.15		1.67
B0004	Arena	m3	0.38	20		7.51
B0005	Cal	Kg	20.76	0.16		3.32
B0006	Betún Asfáltico AC-20	Kg	61.64	0.321		19.79
Subtotal de Equipos y Herramientas:						39.70
Mano de Obra						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C0001	Chofer de Maquinaria	Hora	2	5.29	0.5	5.29
C0002	Operador de la Planta de Asfalto	Hora	1	3.85	0.5	1.925
Subtotal de Equipos y Herramientas:						7.215
<b>Costo Directo Total</b>						<b>141.91</b>

Tabla 58. APU - Asfalto Convencional producido en la Planta de Asfalto.



UNIVERSIDAD DE CUENCA				 <b>Fundada en 1867</b> <b>UNIVERSIDAD DE CUENCA</b>		
FACULTAD DE INGENIERIA: ESCUELA DE INGENIERA CIVIL						
ANALISIS DE PRECION UNITARIOS: ASFALTO CONVENCIONAL PRODUCIDO EN LA PLANTA DE ASFALTO						
Equipos y Herramientas						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A0001	Planta de Asfalto	Hora	1	125	0.5	62.50
A0002	Cargador Frontal	Hora	1	35	0.5	17.50
A0003	Volqueta	Hora	1	30	0.5	15.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						95.00
Materiales						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B0001	Árido 5/8	m3	0.39	16.5		6.39
B0002	Árido 3/8	m3	0.02	16.15		0.30
B0003	Árido 3/16	m3	0.06	16.15		0.91
B0004	Arena	m3	0.33	20		6.61
B0005	Cal	Kg	20.87	0.16		3.34
B0006	Vidrio	m3	0.14	44.24		6.26
B0007	Betún Asfáltico AC-20	Kg	56.54	0.321		18.15
Subtotal de Equipos y Herramientas:						41.97
Mano de Obra						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C0001	Chofer de Maquinaria	Hora	2	5.29	0.5	5.29
C0002	Operador de la Planta de Asfalto	Hora	1	3.85	0.5	1.925
Subtotal de Equipos y Herramientas:						7.215
<b>Costo Directo Total</b>						<b>144.18</b>

Tabla 59. APU - Asfalto Modificado con 15% de Vidrio Producido en la Planta de Asfalto.

Con fines académicos y prácticos para lograr una mejor comprensión, se propone realizar un análisis de costos de la pavimentación de una vía de 1 km, con dos carriles de 3.60 m de ancho cada uno y con un espesor mínimo de carpeta asfáltica de 25 mm. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 60 y Tabla 61.



UNIVERSIDAD DE CUENCA					 Fundada en 1867 <b>UNIVERSIDAD DE CUENCA</b>	
FACULTAD DE INGENIERIA: ESCUELA DE INGENIERA CIVIL						
ANALISIS DE PRECION UNITARIOS: ASFALTO CONVENCIONAL PUESTO EN OBRA						
Equipos y Herramientas						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A0001	Herramientas Manuales	Hora	1	0.4	0.025	0.01
A0002	Volqueta	Hora	1	30	0.025	0.75
A0003	Terminadora Asfáltica	Hora	1	50	0.025	1.25
A0004	Rodillo Liso Vibratorio	Hora	1	40	0.025	1.00
A0005	Rodillo Neumático	Hora	1	40	0.025	1.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						4.01
Materiales						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B0001	Carpeta Asfáltica	m3	180.00	141.91		25544.57
Subtotal de Equipos y Herramientas:						25544.57
Mano de Obra						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C0001	Residente	hh	1	4.06	0.025	0.10
C0002	Maestro Mayor	hh	1	4.04	0.025	0.10
C0003	Peón	hh	6	3.6	0.025	0.54
C0004	Operador de Terminadora Asfáltica	hh	1	3.85	0.025	0.10
C0005	Ayudante de Maquinaria	hh	1	3.85	0.025	0.10
C0006	Operador de Rodillo	hh	2	3.85	0.025	0.19
C0007	Chofer de Volqueta	hh	1	5.29	0.025	0.13
Subtotal de Equipos y Herramientas:						1.26
<b>Costo Directo Total</b>						<b>25549.84</b>
<b>Costo Indirectos (20%)</b>						<b>5109.97</b>
<b>COSTO TOTAL</b>						<b>30659.81</b>

Tabla 60. APU - Asfalto convencional puesto en obra.



UNIVERSIDAD DE CUENCA						
FACULTAD DE INGENIERIA: ESCUELA DE INGENIERA CIVIL						
ANALISIS DE PRECION UNITARIOS: ASFALTO MODIFICADO CON 15% VIDRIO PUESTO EN OBRA						
<b>Equipos y Herramientas</b>						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
A0001	Herramientas Manuales	Hora	1	0.4	0.025	0.01
A0002	Volqueta	Hora	1	30	0.025	0.75
A0003	Terminadora Asfáltica	Hora	1	50	0.025	1.25
A0004	Rodillo Liso Vibratorio	Hora	1	40	0.025	1.00
A0005	Rodillo Neumático	Hora	1	40	0.025	1.00
Subtotal de Equipos y Herramientas:						4.01
<b>Materiales</b>						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
B0001	Carpeta Asfáltica	m3	180.00	144.18		25952.86
Subtotal de Equipos y Herramientas:						25952.86
<b>Mano de Obra</b>						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendimiento	Total
C0001	Residente	hh	1	4.06	0.025	0.10
C0002	Maestro Mayor	hh	1	4.04	0.025	0.10
C0003	Peón	hh	6	3.6	0.025	0.54
C0004	Operador de Terminadora Asfáltica	hh	1	3.85	0.025	0.10
C0005	Ayudante de Maquinaria	hh	1	3.85	0.025	0.10
C0006	Operador de Rodillo	hh	2	3.85	0.025	0.19
C0007	Chofer de Volqueta	hh	1	5.29	0.025	0.13
Subtotal de Equipos y Herramientas:						1.26
<b>Costo Directo Total</b>						<b>25958.13</b>
<b>Costo Indirectos (20%)</b>						<b>5191.63</b>
<b>COSTO TOTAL</b>						<b>31149.76</b>

Tabla 61. APU - Asfalto modificado con 15% de vidrio puesto en obra.

La Tabla 62 muestra la diferencia de costo por kilómetro existente entre la carpeta asfáltica convencional y la carpeta asfáltica modificada con 15% de vidrio, la misma que difiere en 489.95 USD/km.

UNIVERSIDAD DE CUENCA	
FACULTAD DE INGENIERIA: ESCUELA DE INGENIERA CIVIL	
COMPARACION DE COSTOS DEL ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO CON VIDRIO AL 15% DE UNA VIA DE 1KM DE DOS CARRILES	
Costo de la Carpeta Asfaltica Convencional	30 659.81 USD
Costo de la Carpeta Asfaltica Modificada con Vidrio	31 149.76 USD
Diferencia de Costos	<b>489.95 USD</b>

Tabla 62. Comparación de los precios unitarios.



Aunque el costo por kilómetro de vía se incrementa con el uso del vidrio, hay que destacar los beneficios ambientales que se consigue con la adición del vidrio, pues permite aprovechar y reutilizar el vidrio que termina en los rellenos sanitarios donde además de contaminar el ambiente ocupa espacio útil en el relleno ya que la velocidad con la que el vidrio se degrada es lenta.

Además, usar el vidrio como agregado permite reducir la extracción de los áridos que sirven como materia prima para crear el asfalto y como consecuencia de esto se disminuye la alteración de la flora y la fauna de los ecosistemas en donde se encuentran las minas de extracción de los materiales pétreos, igualmente al reciclar el vidrio se disminuye la cantidad de material particulado en el aire producto de la quema de combustibles y la explotación minera (Poveda, Granja, Hidalgo, & Ávila, 2015).



## CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

En este capítulo se presenta las conclusiones obtenidas luego del análisis de los ensayos realizados a cada una de las mezclas asfálticas y el análisis económico efectuado.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente trabajo de titulación, se utilizó como materia prima el betún asfáltico, áridos (5/8", 3/8", 3/16" y arena) propios de la zona, los mismos que fueron proporcionados por la empresa ASFALTA EP, y vidrio recolectado de uso doméstico. Los materiales pétreos, incluyendo el vidrio se caracterizaron para luego poder combinarlos por el método de Fuller, obteniendo así las dosificaciones para la elaboración de las diferentes briquetas.

Se diseñaron briquetas, con adición de vidrio en porcentajes de 5, 10, 15 y 20% y sin ninguna adición de vidrio a las cuales se les llamó mezclas patrón. Las briquetas elaboradas poseen un contenido de betún entre 5% y 7%, de los cuales se prepararon 3 muestras para cada combinación, dando un total de 85 briquetas elaboradas. Luego estos especímenes se ensayaron a través del ensayo Marshall y Rice con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo de asfalto y demás propiedades volumétricas ( $V_a$ ,  $VMA$ ,  $VFA$ ). Una vez encontrado el porcentaje óptimo de betún para cada tipo de briketa se realizaron ensayos de abrasión, adherencia y un análisis económico, con el objetivo de contrastar las diferencias que existen entre una mezcla asfáltica convencional y modificada.

De esta manera se logra corroborar satisfactoriamente los objetivos y la hipótesis planteada para el presente trabajo de titulación, en donde es posible hacer uso del reciclaje de materiales, en este caso vidrio, para lograr obtener un beneficio mayor dentro de las mezclas asfálticas y al mismo tiempo que ayude al medio ambiente (Poveda, Granja, Hidalgo, & Ávila, 2015).

### 4.1. Conclusiones

- Al término de este trabajo de titulación, se logró diseñar una mezcla asfáltica alternativa con vidrio triturando, a pesar de que los resultados del ensayo Marshall fueron escalados, sí se evidenció que la adición de vidrio fue beneficioso para ciertas propiedades de la mezcla asfáltica, luego de contrastarla con las propiedades de una mezcla asfáltica convencional.
- La revisión sistemática realizada a la bibliografía relacionada con el uso del vidrio en mezclas asfálticas en caliente, nos dió una base para el desarrollo de este trabajo de titulación, pues avala con trabajos previos, el éxito de la incorporación del vidrio triturado en las mezclas, e incluso en ciudades de EEUU esta propuesta se la han llevado al campo, pavimentando varios kilómetros de vías.
- La caracterización de los agregados pétreos (áridos 5/8", 3/8", 3/16" y arena) y ligante asfáltico usados en el diseño de las mezclas asfálticas en



- caliente (patrón, modificada con vidrio), cumplen con las especificaciones establecidas por la MOP-001-F2002 y NEVI-2012.
- La caracterización del vidrio se lo realizó de la misma manera como si se tratara de cualquier otro árido más, sin embargo al ser una material novedoso dentro de la utilización de las mezclas asfálticas, este no cuenta con una normativa dentro del país, por lo cual fue prudente trabajar bajo la normativa AASHTO M318: "*Standard Specification for Glass Cullet Use for Soil – Aggregate Base Course*", con el fin de que la curva granulométrica se encuentre dentro de la franja establecida por dicha norma.
  - La absorción de los áridos fino y grueso según norma NEVI-12 debe ser de 0.5% o 1% según corresponda, los áridos 5/8", 3/8" y arena cumplen satisfactoriamente con la norma; sin embargo, el árido 3/16" esta fuera del rango con 1.07% de absorción, pero según el tipo diseño se puede considerar esta absorción.
  - La absorción del vidrio según la literatura debería ser nula, pero se obtuvo una absorción de 8.44% y un peso específico de 1.98 g/cm<sup>3</sup>; sin embargo, al no existir una norma para materiales como el vidrio, no es prudente evaluar dicho valor bajo el criterio de la Tabla 405-5.2 de la norma NEVI-12 para la absorción de agregados finos. Además, lo que se pretende es demostrar la capacidad y desempeño del vidrio dentro de las propiedades de las mezclas asfálticas.
  - La combinación de agregados para la mezcla asfáltica patrón con la cual se trabajó cumple con la franja granulométrica de límites máximos y mínimos establecidos en la Tabla 405.5-1 de la norma MOP-001-F 2002 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO). La granulometría de esta mezcla asfáltica utilizó proporciones del 8% del agregado A (árido 3/8), 40% del agregado B (árido 5/8), 11% del agregado C (árido 3/16), 40% del agregado D (arena) y 1% del agregado F (cal hidratada).
  - En la mezcla asfáltica convencional se ensayaron cinco diferentes porcentajes de betún y los parámetros de porcentaje de vacíos, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto, densidad bulk, estabilidad y flujo, cumplen satisfactoriamente con los criterios NAPA para un tráfico mediano. Además, se determinó un porcentaje óptimo de asfalto de 6.5%, mismo que posee: estabilidad de 6327.23 lbs, flujo de 3.61 mm, vacíos de aire de 4.41%, vacíos de agregado mineral de 20.03% y vacíos llenos de asfalto de 77.98%; todos los valores antes mencionados cumplen con los requerimientos establecidos en la normativa.
  - La franja granulométrica resultante de la combinación de agregados y el vidrio en sus diferentes porcentajes (5% ,10%,15% y 20%) para la mezcla asfáltica con vidrio triturado, cumple de igual manera con los límites máximos y mínimos establecidos en la Tabla 405.5-1 de la norma MOP-001-F 2002 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO).



- La mezcla asfáltica modificada con 5% de vidrio obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 6.33%, con una estabilidad de 5594.42 lbs, un flujo de 4.09 mm, 3.89% de vacíos de aire y 18.54% de vacíos de agregado mineral y 79.04% de vacíos llenos de asfalto. Los valores correspondientes al VFA y flujo están fuera del rango establecido por la norma que dice que el VFA máximo puede tomar el valor de 78% y el flujo también un valor máximo 4 mm; por tanto, la mezcla asfáltica con adición del 5% de vidrio no cumple con los requerimientos establecidos.
- La mezcla asfáltica modificada con 10% de vidrio obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 6.13%, con una estabilidad 5830.13 lbs, un flujo de 3.51 mm, 3.86% de vacíos de aire, 17.13% de vacíos de agregado mineral y 77.50% de vacíos llenos de asfalto. Todos los valores citados se encuentran dentro de los rangos establecidos por la norma.
- La mezcla asfáltica modificada con 15% de vidrio obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 5.93%, con una estabilidad 6413.27 lbs, un flujo de 3.69 mm, un porcentaje de vacíos de aire de 3.56%, un 15.34% de vacíos de agregado mineral y finalmente un porcentaje de vacíos llenos de asfalto de 76.77%. Todos los valores mencionados cumplen con los requerimientos establecidos por la norma, pues se encuentran dentro de los rangos.
- La mezcla asfáltica modificada con 20% de vidrio obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 5.90%, con una estabilidad de 6701.40 lbs, un flujo de 2.99 mm, 3.19% de vacíos de aire y 13.56% de vacíos de agregado mineral y 76.45% de vacíos llenos de asfalto. El valor correspondiente al VMA no cumple con el rango mínimo establecido que es 14%; por tanto, la mezcla asfáltica con adición del 20% de vidrio no cumple con los requerimientos establecidos por la norma.
- Al comparar las cuatro diferentes adiciones de vidrio (5%,10%,15% y 20%), se observa que los valores de estabilidad incrementan a la par con la adición de vidrio. Sin embargo, para el porcentaje de betún es todo lo contrario pues este va disminuyendo y sucede algo similar con los demás parámetros.
- De los cuatro porcentajes de vidrio que se combinaron en la mezcla asfáltica, solo las mezclas que poseen el 10% y el 15% de vidrio, cumplen con los requerimientos que establece la norma. De estos dos porcentajes, basándose en los parámetros resultantes de los ensayos, la adición de vidrio más conveniente resulta con la del 15%; pues le ofrece a la mezcla una mayor estabilidad, y menores valores en las demás propiedades volumétricas y sobre todo un menor porcentaje óptimo de betún.
- Las gráficas del porcentaje de vidrio versus los diferentes parámetros (Va, VFA, VMA, Estabilidad, flujo y % asfalto), no solo están en función de la incorporación de vidrio, si no de las diferentes combinaciones efectivas de árido resultantes del método Fuller; lo que conlleva a que éstas tengan diferentes variaciones en su comportamiento.



- Del contraste de los parámetros entre la mezcla asfáltica convencional y las mezclas asfálticas modificadas con vidrio, se nota variaciones significativas, pues el valor de la estabilidad de la primera es de 6327.23 lbs y para las modificadas con 15% y 20% de vidrio se tiene valores de 6413.27 lbs y 6701.40 lbs correspondientemente; estas dos últimas son superiores a la mezcla asfáltica patrón.
- El porcentaje óptimo de betún es también otro parámetro que presenta variaciones pues este se ve disminuido al incorporar vidrio; para la mezcla asfáltica patrón se tiene un valor de 6.5% de betún y para la modificada con 15% de vidrio un valor de 5.93%; la disminución de este parámetro se verá reflejado directamente en el costo; por tanto, el porcentaje de betún con el 15% de vidrio es el más conveniente en términos económicos.
- Al considerar los resultados del ensayo de abrasión, la mezcla asfáltica patrón y las modificadas con vidrio presentaron un desgaste menor al 2%, sin embargo, la mezcla asfáltica patrón obtuvo un desgaste de 1.76% superior al desgaste presentado con las mezclas asfálticas modificadas con vidrio, pues el mismo no supera el 0.5% en las mezclas asfálticas modificadas con 10%, 15%, 20% y 0.98% de desgaste en las modificadas con 5%.
- En el ensayo de adherencia los dos tipos mezclas obtuvieron una buena adherencia superando al 95% de lo estipulado en la norma ASTM D 3625–96: *“Práctica estándar para el efecto del agua en áridos con revestimiento bituminoso utilizando agua hirviendo”*.
- Del análisis de precios unitarios se determina que el costo de 1 m<sup>3</sup> de mezcla asfáltica convencional es de 141.91 USD y de 144.18 USD para una mezcla asfáltica modificada con 15% de vidrio.
- La diferencia de estos costos entre las dos mezclas se ve reflejada de mejor manera, cuando se realiza el APU para una vía; de este análisis resulta que el costo por kilómetro de vía se incrementa para una mezcla asfáltica modificada con 15% de vidrio triturado en 489.95 USD comparado con el costo de una vía realizada con mezcla asfáltica convencional. Sin embargo, el incremento en el costo no es de gran magnitud si consideramos el beneficio que se llega a tener al incorporar vidrio a la mezcla asfáltica; pues es importante destacar que con la incorporación del vidrio se mejora las propiedades de la mezcla asfáltica, volviéndolo más resistente de lo normal, lo cual directamente se puede asociar a la vida útil del pavimento.
- Del análisis realizado se puede concluir finalmente que se ha logrado obtener un diseño alternativo de mezcla asfáltica, incorporando el 15% de vidrio; los porcentajes de combinación de agregados para obtener esta la mezcla asfáltica modificada es de: 2% del agregado A (árido 3/8), 41% del agregado B (árido 5/8), 6% del agregado C (árido 3/16), 35% del



agregado D (arena), 1% del agregado F (cal hidratada) y 15% del árido E (vidrio).

La franja granulométrica que resulta de la combinación de los diferentes porcentajes de áridos, cumple satisfactoriamente con los límites máximos y mínimos establecidos en la Tabla 405.5-1 de la norma MOP-001-F 2002 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO).

A pesar de que el asfalto modificado tiene un costo adicional, el beneficio que se obtiene a futuro, se puede compensar con la duración de este tipo de asfalto y dar una solución ambiental frente al manejo de los desperdicios en preservación del medio ambiente.

- La alta absorción del vidrio no afectó las características de la mezcla asfáltica y a la absorción de betún, debido a que el valor de la absorción se puede atribuir a una característica en particular, en donde "*la cantidad de absorción es directamente proporcional a la presión capilar, tiempo e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido*" (Lee, Guinn, Khandhal, & Dunning, 1990) y el betún al tener una viscosidad alta no permite ser absorbida por el vidrio, además de que no se adhiere al vidrio por ser ésta una partícula lisa.
- El método que se aplicó para obtener el peso específico y absorción del vidrio quizá no sea el más recomendado debido a que el vidrio no es un material poroso ni absorbente, por lo tanto el valor de absorción determinado puede ser el valor de su absorción capilar por inmersión.
- Una característica importante a destacar dentro de la elaboración de todas las briquetas, sean estas convencionales o modificadas con vidrio triturado, es el uso de la cal con el propósito de brindarle a las mezclas asfálticas una mayor adherencia, entre los agregados y la película de asfalto que llega a formarse entre ellas.

## 4.2. Recomendaciones

### 4.2.1. Recomendaciones con respecto a la investigación

- Se recomienda triturar el vidrio con una máquina de trituración, para obtener una franja granulométrica más uniforme y con más variedad de tamices.
- Se recomienda usar una máquina de mezclado para mezclar los áridos y el betún, pues así se tendrá un mezclado más adecuado y uniforme.
- Se recomienda realizar el ensayo de "*Adherencia de los ligantes bituminosos a los agregados finos*", comúnmente conocido como el método de Riedel-Weber.
- Se recomienda realizar un análisis ambiental, que muestre de manera cuantitativa el beneficio de la incorporación del vidrio a la mezcla asfáltica.
- Se recomienda realizar un estudio de prefactibilidad para la implementación de una planta trituradora de vidrio en la ciudad de



Cuenca, con el objetivo de reciclar e industrializar dicho proceso y lograr obtener una disminución en el costo unitario del vidrio.

- Se recomienda realizar nuevamente el ensayo Marshall con los diferentes porcentajes de betún tanto para la mezcla asfáltica convencional como para la mezcla asfáltica con incorporación de vidrio en sus diferentes porcentajes, ya que los resultados presentados en esta investigación son escalados y las conclusiones son estimadas por lo que sería pertinente verificar con los datos reales.
- Se recomienda realizar un análisis de costos a lo largo de toda la vida útil del pavimento, iniciando desde la fabricación del vidrio como agregado, hasta el mantenimiento del pavimento.
- Se recomienda utilizar otra metodología para determinar el valor de la absorción del vidrio, puesto que no se debe seguir la misma metodología utilizada para determinar la absorción de los áridos.

#### **4.2.2. Recomendaciones con respecto a trabajos futuros**

- Se recomienda usar otros tipos de porcentaje de adición y graduación de vidrio, para ampliar la investigación y saber cómo cambia el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente.
- Se recomienda realizar la misma metodología seguida en este trabajo de titulación, pero con el uso de otros tipos de vidrio como son: vidrios de ventanas, focos, cristalería de laboratorios, entre otros.
- Se recomienda realizar una investigación, donde se compare y evalúe las propiedades del uso del vidrio y fibras de vidrio en mezclas asfálticas en caliente.
- Se recomienda investigar el efecto de la incorporación de vidrio triturado en la mezcla asfáltica en caliente, haciendo uso de otra metodología como por ejemplo Superpave, para complementar el comportamiento y pueda darse una mayor aplicabilidad a estos resultados y emplearse en la operación de una vía. Sin embargo, para el empleo de esta metodología de Superpave es necesario contar con equipos adecuados.
- Se recomienda ampliar el campo de investigación con ensayos para determinar la resistencia a la tensión indirecta de la mezcla asfáltica compactada, producto del daño inducido por la humedad. Este ensayo no se realizó en el desarrollo de esta investigación pues el equipo empleado no forma parte de los equipos del laboratorio de la Universidad de Cuenca.
- Se recomienda investigar la variación de los diferentes parámetros ( $V_a$ , VMA, VFA, estabilidad, flujo, % asfalto) versus el porcentaje de vidrio, haciendo uso de la misma dosificación en todos los porcentajes de vidrio incorporados.



## REFERENCIAS

---

- Aashish, A., & Tamrakar, G. B. (2019). Effect of Adding Waste Crushed Glass to Asphalt Mix. *International Journal of Advanced Engineering and Management*.
- AASHTO M 318. (2002). *AASHTO M 318: Standard Specification for Glass Cullet Use for Soil-Aggregate Base Course*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 209. (2012). *AASHTO T 209: Standard Method for Theoretical Maximum Specific Gravity (Gmm) and Density of Hot Mix Asphalt (HMA)*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 245. (2015). *AASHTO T 245: Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Asphalt Mixtures Using Marshall Apparatus*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 84. (2013). *AASHTO T 84: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 85. (2013). *AASHTO T 85: Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T 96. (2012). *AASHTO T 96: Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. Washington D.C., Estados Unidos: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Aguilar B, S. B., Hernández M, E. A., & Sibrián H, Y. R. (2016). *Diseño de mezcla asfáltica en caliente con cal hidratada para el mejoramiento de la resistencia a la humedad*. San Salvador.
- Alhassan, H. M., Yunusa, G. H., & Sanusi, a. D. (2018). Potential of Glass Cullet as Aggregate in Hot Mix Asphalt. *Nigerian Journal of Technology*.
- Almeida Beltrán, J. B., & Trujillo Vivas, C. R. (2017, abril 18). Principios basicos de la construccion sostenible utilizando vidrio triturado en la elaboracion de hormigones. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.
- Alvear, K. N. (2018). *Uso de vidrio molido en las mezclas asfálticas, con el propósito de reducir la contaminación*. Quito.
- Anochie-Boateng, J. K., & George, T. B. (2016). Use of Waste Crushed Glass for the Production of Hot-Mix Asphalt.
- Asphalt Institute. (2014). *Principios de Construcción de Pavimentos de Mezcla Asfáltica en Caliente*.



- ASTM C127. (2015). *ASTM C1127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C128. (2010). *ASTM C128-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C128. (2015). *ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C131. (2015). *ASTM C131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. West conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C136M. (2010). *ASTM C136M-10: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM C702. (2018). *ASTM C702: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D1559. (1998). *ASTM D1559: Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D2041. (2019). *ASTM D2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials .
- ASTM D2726. (2019). *ASTM D2726: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D3625. (2005). *ASTM D3625: Standard Practice for Effect of Water on Asphalt-Coated Aggregate Using Boiling Water*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- ASTM D6927. (2015). *ASTM D6927: Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures*. West Conshohocken, Pensilvania, Estados Unidos: American Society for Testing and Materials.
- Bardasano, R. (2020, Diciembre 30). *PaveIng - El asombroso mundo de la ingeniería de pavimentos*. Retrieved from <http://paveing.blogspot.com/2016/04/terminos-pavimento-o-firme-ii.html>
- Br. Torres Martínez, J. (2019). *Uso del vidrio reciclado en el diseño de Mezcla Asfáltica para la Av. Chulucanas entre Av. Sánchez Cerro y Av. Principal de Santa Margarita- Piura, 2018*". Piura, Perú.



- Cabascango, M., Benalcázar, J., & Suárez, A. (2016). Pavimentos sustentables con vidrio reciclado en asfalto para vías públicas. *Congreso Internacional de Ingenierías*.
- Carrera Morán, I., Clavijo Edgar, D., & Suárez Orrala, M. (2009). Proyecto de reingeniería de procesos de una recicladora de vidrio en la ciudad de Guayaquil caso: RECYVIDRIOS. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superiores Politécnica del Litoral.
- Cruz Salgado, C. A., & Rosales Gavilanez, S. X. (2018). *Diseño de hormigón bicompuesto con vidrio triturado y fibras de acero reciclado*. Quito, Ecuador.
- Dalloul, K. N. (2013). *Study of the Effect of Crushed Waste Glass as Coarse Sand and Filler in the Asphalt Binder Course*.
- Disfani, M., Arulrajah, A., Bo, M., & Sivakugan, N. (2011). Environmental risks of using recycled crushed glass in road applications. *Journal of Cleaner Production*.
- Flores Siguenza, C. A., & Vázquez Flores, M. E. (2017). *RELACIÓN DE LAS PROPIEDADES MARSHALL DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE*. Cuenca - Ecuador.
- Fulton, B., & Hogan, F. (2008). *Use of Recycled Glass in Pavement Aggregate*. New Zealand.
- Garnica Anguas, P., Flores Flores, M., Gómez López, J. A., & Delgado Alamilla, H. (2005). Caracterización de Mezclas Asfálticas. Sanfandila, Qro.
- Gutierrez Silvestre, A. A. (2018). *Asfaltos modificados con vidrio y su comparación técnico y económico con los asfaltos convencionales*. Huancayo - Perú.
- Halstead, W. J. (1992). *Use of Waste Glass in Highway Construction*.
- I.N.V.E - 760. (2007). *I.N.V.E - 760: Caracterización de las mezclas bituminosas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste*. Instituto Nacional de Vías.
- Instituto Ecuatoriano de Vialidad. (2012). *Norma Ecuatoriana de Vialidad*. Ecuador.
- INVE E-760. (2012). *Asfaltos modificados con vidrio y su comparación técnico y económico con los asfaltos convencionales*. Instituto Nacional de Vías.
- Jasim, A. A. (2014). By Using Waste Glass as Secondary Aggregates in Asphalt Mixtures. *International Journal of Advanced Research*.
- Krishnan Viswanathan, B. (1996). *Characterization of Waste Recycled Glass as Highway Material*. Texas.
- Lee, D.-Y., Guinn, J. A., Khandhal, P. S., & Dunning, R. L. (1990). *Absorption of Asphalt Into Porous Aggregates*. Washington, D.C.: Strategic Highway Research Program.
- Ministerio del Ambiente y Agua. (n.d.). *Reciclaje de vidrio del país con actores estratégicos del sector*. (Gobierno de la Republica del Ecuador) Retrieved 2020,



from <https://www.ambiente.gob.ec/reciclaje-de-vidrio-del-pais-con-actores-estrategicos-del-sector/>

- Montejo Fonseca, A. (1998). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá.
- MTOP. (2002). *Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Especificaciones generales para la Construcción de Caminos y Puentes*. Ecuador: MTOP.
- NTE INEN 2515. (2010). *NTE INEN 2515: Productos Derivados del Petróleo. Cemento Asfáltico (Clasificación por Viscosidad). Requisitos*. Quito, Ecuador : Norma Técnica Ecuatoriana.
- Ogundipe, O. M., & Nnochiri, E. S. (2018). Evaluation of the Effects of Waste Glass in Asphalt Concrete Using the Marshall Test.
- Orellana Orellana, J. R., & Solano Mosquera, J. E. (2019). *Dosificación óptima en pavimento flexible de asfalto y caucho reciclado utilizando materiales de la región*. Cuenca - Ecuador.
- Poveda, R., Granja, V., Hidalgo, D., & Ávila, C. (2015, Febrero). Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. *Revista Politecnica*, 35(3).
- Raad, L. (1992). *Potential Utilization of Recycled Waste Glass in Alaskan Pavements*.
- Salah, M. M. (2009). *Effect of Glass Concentratio on Properties of Glasphalt*.
- SEPRO S.A.S. (2020, Febrero 20). *Estudios sobre aplicaciones prácticas para la incorporación de vidrio molido en la fabricación de pavimentos y concretos*. Retrieved from <https://gruposerpro.com/aplicaciones-vidrio-en-pavimentos-concretos/>
- Shafabakhsh, G., & Sajed, Y. (2014). Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials; case study: Glass cullet. *Case Studies in Construction Materials*.
- Tahmoorian, F., Samali, B., Yeaman, J., & Crabb, R. (2018). The Use of Glass to Optimize Bitumen Absorption of Hot Mix Asphalt Containing Recycled Construction Aggregates. *Materials*.
- Theresa Bernadette, G. (2018). *Advanced Characterisation of Hot Mix Asphalt with Recycled Crushed Glass*. South Africa.
- White, G., Sorensen, L., & Jamshidi, A. (2019). Evaluation of glass as a sand replacement in asphalt. *University of the Sunshine Coast, Sippy Downs, Queensland*.
- Yepes, V. (2014, abril 18). *Universidad Politecnica de Valencia/Blogs*. Retrieved 2020, from <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/mezcla-asfaltica/>



**ANEXOS**

Resultados del Equipo Marshall - Patrón					
<b>Factor Escala Estabilidad:</b>		12.22	<b>Factor Escala Flujo</b>		0.659
<b>Ecuación:</b> $Estab [lb] = \left(\frac{5000}{492}\right) * Nro.Rayas$			<b>Ecuación:</b> $Flujo [mm] = 0.025 * Nro.Rayas$		
Estabilidad			Flujo		
Nro. Rayas	Real [lb]	Escalada [lb]	Nro. Rayas	Real [mm]	Escalada [mm]
37.6	382.1	4669.43	182.7	4.6	3.010
37.8	384.1	4694.27	103.8	2.6	1.710
34.3	348.6	4259.61	163.9	4.1	2.700
45.0	457.3	5588.41	117.1	2.9	1.930
48.4	491.9	6010.65	166.9	4.2	2.750
55.4	563.0	6879.96	219.1	5.5	3.610
39.6	402.4	4917.80	182.1	4.6	3.000
44.3	450.2	5501.48	227.0	5.7	3.740
46.8	475.6	5811.95	203.9	5.1	3.360
53.2	541.1	6612.66	214.9	5.4	3.540
52.1	529.6	6471.14	228.2	5.7	3.760
47.5	482.7	5898.88	214.9	5.4	3.540
44.4	451.4	5515.53	258.0	6.4	4.250
45.7	464.8	5679.90	188.2	4.7	3.100
46.3	470.7	5751.48	278.0	6.9	4.580

Anexo 1. Resultados reales con el equipo Marshall para muestra patrón.

Resultados del Equipo Marshall - 5% Vidrio					
<b>Factor Escala Estabilidad:</b>		12.22	<b>Factor Escala Flujo</b>		0.659
<b>Ecuación:</b> $Estab [lb] = \left(\frac{5000}{492}\right) * Nro.Rayas$			<b>Ecuación:</b> $Flujo [mm] = 0.025 * Nro.Rayas$		
Estabilidad			Flujo		
Nro. Rayas	Real [lb]	Escalada [lb]	Nro. Rayas	Real [mm]	Escalada [mm]
45.5	461.9	5644.59	215.0	5.4	3.542
46.8	475.1	5806.04	210.0	5.3	3.460
46.5	472.6	5775.29	190.0	4.7	3.130
46.1	468.5	5725.02	183.0	4.6	3.015
38.4	390.3	4769.37	165.0	4.1	2.718
41.5	421.3	5147.85	228.0	5.7	3.756
46.0	467.0	5706.69	246.0	6.2	4.053
43.9	445.7	5445.89	213.0	5.3	3.509
44.2	448.7	5483.15	190.0	4.7	3.130
45.6	462.9	5657.01	237.0	5.9	3.905
43.9	446.2	5452.4	176.0	4.4	2.900
46.3	470.5	5749.86	382.0	9.5	6.293
47.2	479.9	5864.88	192.0	4.8	3.163
46.2	469.3	5734.78	219.0	5.5	3.608
47.5	482.2	5892.97	252.0	6.3	4.152

Anexo 2. Resultados reales con el equipo Marshall para 5% de vidrio.



Resultados del Equipo Marshall - 10% Vidrio					
<b>Factor Escala Estabilidad:</b>		12.22	<b>Factor Escala Flujo</b>		0.659
<b>Ecuación:</b> $Estab [lb] = \left(\frac{5000}{492}\right) * Nro.Rayas$			<b>Ecuación:</b> $Flujo [mm] = 0.025 * Nro.Rayas$		
Estabilidad			Flujo		
Nro. Rayas	Real [lb]	Escalada [lb]	Nro. Rayas	Real [mm]	Escalada [mm]
34.3	348.9	4263.52	175.0	4.4	2.883
36.2	368.1	4498.17	180.0	4.5	2.966
36.2	367.9	4495.57	179.0	4.5	2.949
42.2	428.4	5234.78	207.0	5.2	3.410
42.3	430.3	5258.31	186.0	4.6	3.064
42.0	426.3	5209.94	178.0	4.5	2.933
47.5	483.0	5902.13	234.0	5.8	3.855
47.6	483.3	5905.39	206.0	5.2	3.394
48.6	493.7	6032.83	230.0	5.7	3.789
50.3	510.7	6241.34	242.0	6.1	3.987
50.2	509.7	6228.92	223.0	5.6	3.674
49.3	500.6	6117.15	228.0	5.7	3.756
35.0	355.7	4346.55	223.0	5.6	3.674
37.0	376.0	4594.92	177.0	4.4	2.916
39.6	402.4	4917.81	151.0	3.8	2.488

Anexo 3. Resultados reales con el equipo Marshall para 10% de vidrio.

Resultados del Equipo Marshall - 15% Vidrio					
<b>Factor Escala Estabilidad:</b>		12.22	<b>Factor Escala Flujo</b>		0.659
<b>Ecuación:</b> $Estab [lb] = \left(\frac{5000}{492}\right) * Nro.Rayas$			<b>Ecuación:</b> $Flujo [mm] = 0.025 * Nro.Rayas$		
Estabilidad			Flujo		
Nro. Rayas	Real [lb]	Escalada [lb]	Nro. Rayas	Real [mm]	Escalada [mm]
43.9	446.4	5455.06	200.0	5.0	3.295
44.8	455.0	5560.33	232.0	5.8	3.822
43.9	446.1	5451.81	178.0	4.5	2.933
51.2	520.6	6361.63	238.0	5.9	3.921
51.2	520.3	6358.37	225.0	5.6	3.707
54.5	553.9	6768.19	200.0	5.0	3.295
53.6	544.7	6656.42	232.0	5.8	3.822
51.4	522.4	6383.21	228.0	5.7	3.756
52.4	532.5	6507.40	213.0	5.3	3.509
50.3	511.2	6246.61	201.0	5.0	3.311
49.1	499.0	6097.58	238.0	5.9	3.921
52.7	535.6	6544.65	200.0	5.0	3.295
55.1	560.0	6842.70	214.0	5.4	3.526
47.2	479.7	5861.63	210.0	5.3	3.460
51.0	518.3	6333.54	238.4	6.0	3.928

Anexo 4. Resultados reales con el equipo Marshall para 15% de vidrio.



Resultados del Equipo Marshall - 20% Vidrio					
<b>Factor Escala Estabilidad:</b>		12.22	<b>Factor Escala Flujo</b>		0.659
<b>Ecuación:</b> $Estab [lb] = \left(\frac{5000}{492}\right) * Nro.Rayas$			<b>Ecuación:</b> $Flujo [mm] = 0.025 * Nro.Rayas$		
Estabilidad			Flujo		
Nro. Rayas	Real [lb]	Escalada [lb]	Nro. Rayas	Real [mm]	Escalada [mm]
49.0	498.0	6085.16	178.0	4.5	2.933
54.3	551.8	6743.35	212.0	5.3	3.493
52.6	534.6	6532.24	153.0	3.8	2.521
55.1	560.0	6842.70	172.0	4.3	2.834
59.5	604.7	7389.11	199.0	5.0	3.279
55.5	564.0	6892.38	174.0	4.4	2.867
58.9	598.6	7314.61	189.0	4.7	3.114
55.9	568.1	6942.05	159.0	4.0	2.620
53.6	544.7	6656.42	196.0	4.9	3.229
52.5	533.5	6519.82	194.0	4.8	3.196
53.4	542.7	6631.59	201.0	5.0	3.311
56.8	577.2	7053.82	185.0	4.6	3.048
49.2	500.5	6115.92	198.0	4.9	3.262
50.5	513.7	6277.36	202.0	5.1	3.328
54.8	556.9	6805.45	182.0	4.5	2.998

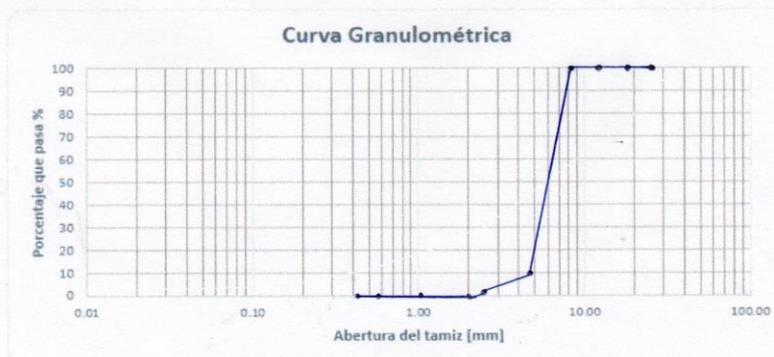
Anexo 5. Resultados reales con el equipo Marshall para 20% de vidrio.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos      **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque      Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido A (agregado 3/8)  
**FECHA:** 22/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.50	2.00	2.00	0.04	99.96	
3/8"	9.50	4.00	6.00	0.12	99.88	
N. 4	4.75	4459.50	4465.50	89.31	10.69	
N. 8	2.38	480.50	4946.00	98.92	1.08	
N. 10	2.00	20.50	4966.50	99.33	0.67	
N.16	1.19	21.50	4988.00	99.76	0.24	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	9.00	4997.00	99.94	0.06	
N. 40	0.42	3.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 6. Granulometría Árido A – 1.

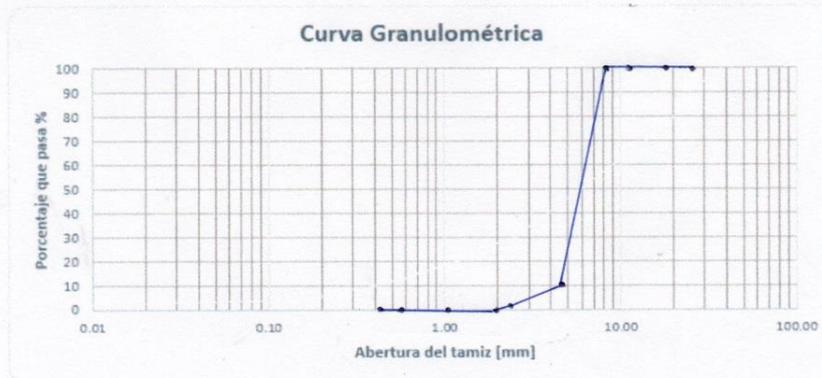


Fundada en 1867  
UNIVERSIDAD DE CUENCA

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Arido A (agregado 3/8)  
 FECHA 22/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.50	1.50	1.50	0.03	99.97	
3/8"	9.50	6.50	8.00	0.16	99.84	
N. 4	4.75	4413.50	4421.50	88.43	11.57	
N. 8	2.38	480.50	4902.00	98.04	1.96	
N. 10	2.00	40.00	4942.00	98.84	1.16	
N.16	1.19	31.50	4973.50	99.47	0.53	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	17.50	4991.00	99.82	0.18	
N. 40	0.42	9.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ gr  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ gr  
 PESO ANTES LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ gr  
 PESO DESP. LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ gr



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad =  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura =  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 7. Granulometría Árido A – 2.



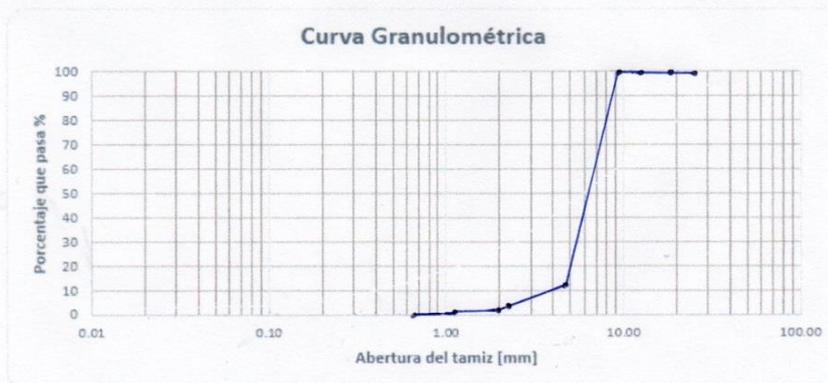
Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Arido A (agregado 3/8)  
 FECHA 22/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.50	1.50	1.50	0.03	99.97	
3/8"	9.50	5.00	6.50	0.13	99.87	
N. 4	4.75	4358.50	4365.00	87.30	12.70	
N. 8	2.38	490.00	4855.00	97.10	2.90	
N. 10	2.00	47.50	4902.50	98.05	1.95	
N.16	1.19	41.50	4944.00	98.88	1.12	
N. 20	0.84					
N. 30	0.59	44.00	4988.00	99.76	0.24	
N. 40	0.42	12.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ (gr)  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ (gr)

PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ (gr)  
 PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ (gr)



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad =  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura =  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 8. Granulometría Árido A – 3.

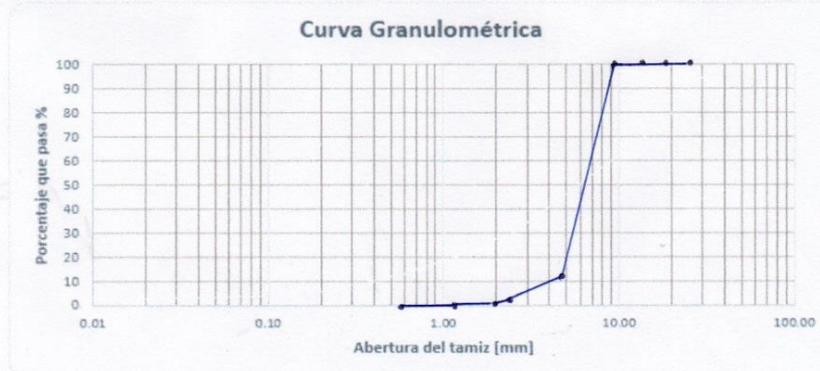


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Arido A (agregado 3/8)  
 FECHA 22/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.50	2.50	2.50	0.05	99.95	
3/8"	9.50	6.50	9.00	0.18	99.82	
N. 4	4.75	4387.50	4396.50	87.93	12.07	
N. 8	2.38	524.50	4921.00	98.42	1.58	
N. 10	2.00	17.00	4938.00	98.76	1.24	
N. 16	1.19	29.00	4967.00	99.34	0.66	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	21.50	4988.50	99.77	0.23	
N. 40	0.42	11.50	5000.00	100.00	0.00	
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Signature]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 9. Granulometría Árido A – 4.

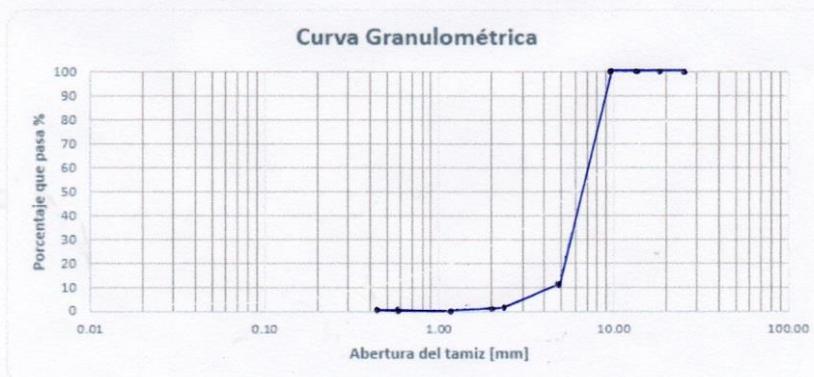


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido A (agregado 3/8)  
 FECHA 22/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.50	2.50	2.50	0.05	99.95	
3/8"	9.50	8.50	11.00	0.22	99.78	
N. 4	4.75	4463.00	4474.00	89.48	10.52	
N. 8	2.38	457.00	4931.00	98.62	1.38	
N. 10	2.00	21.50	4952.50	99.05	0.95	
N.16	1.19	28.50	4981.00	99.62	0.38	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	14.00	4995.00	99.90	0.10	
N. 40	0.42	5.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

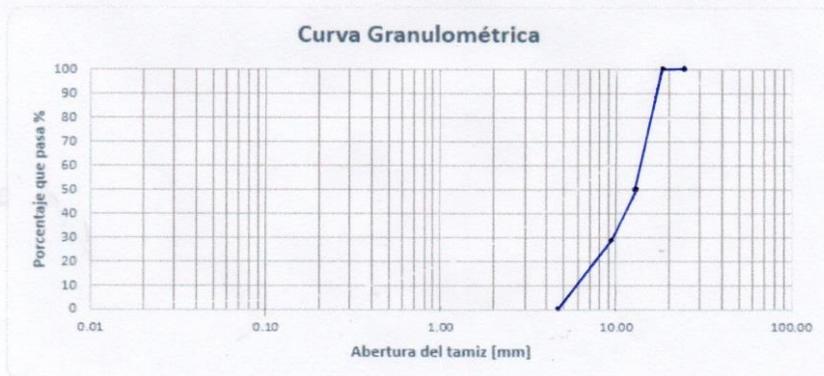
Anexo 10. Granulometría Árido A – 5.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos      **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojarque      Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Arido B (agregado 5/8)  
**FECHA:** 23/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	19.00	19.00	0.38	99.62	
1/2"	12.50	2516.50	2535.50	50.71	49.29	
3/8"	9.50	1075.50	3611.00	72.22	27.78	
N. 4	4.75	1389.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N.16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 11. Granulometría Árido B – 1.

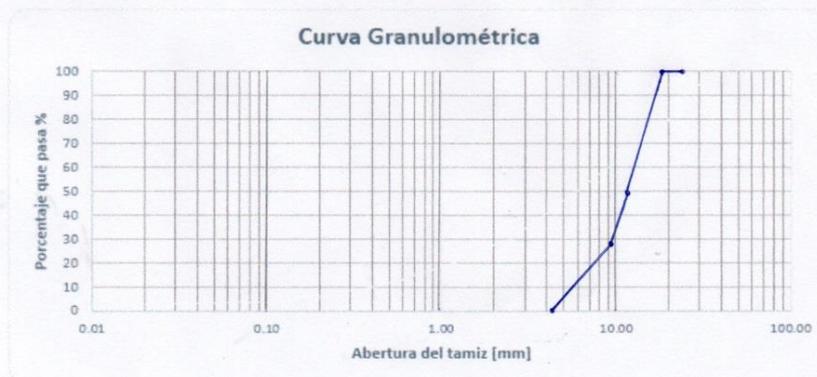


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido B (agregado 5/8)  
 FECHA 23/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	9.50	9.50	0.19	99.81	
1/2"	12.50	2525.00	2534.50	50.69	49.31	
3/8"	9.50	1074.00	3608.50	72.17	27.83	
N. 4	4.75	1391.50	5000.00	100.00	0.00	
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N.16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 12. Granulometría Árido B – 2.

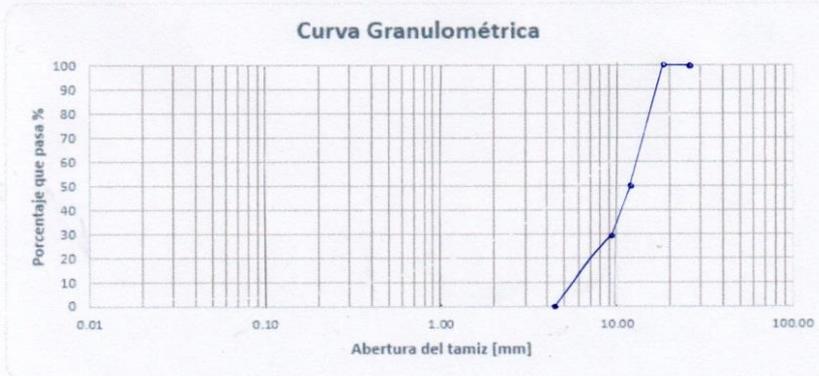


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido B (agregado 5/8)  
 FECHA 23/septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	18.00	18.00	0.36	99.64	
1/2"	12.50	2467.00	2485.00	49.70	50.30	
3/8"	9.50	1032.50	3517.50	70.35	29.65	
N. 4	4.75	1482.50	5000.00	100.00	0.00	
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N. 16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad =  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura =  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 13. Granulometría Árido B – 3.

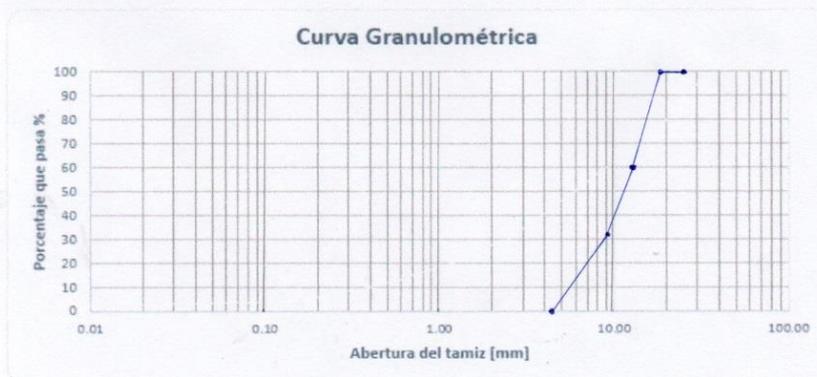


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido B (agregado 5/8)  
 FECHA 23/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	9.50	9.50	0.19	99.81	
1/2"	12.50	1996.50	2006.00	40.12	59.88	
3/8"	9.50	1346.50	3352.50	67.05	32.95	
N. 4	4.75	1647.50	5000.00	100.00	0.00	
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N. 16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 14. Granulometría Árido B – 4.

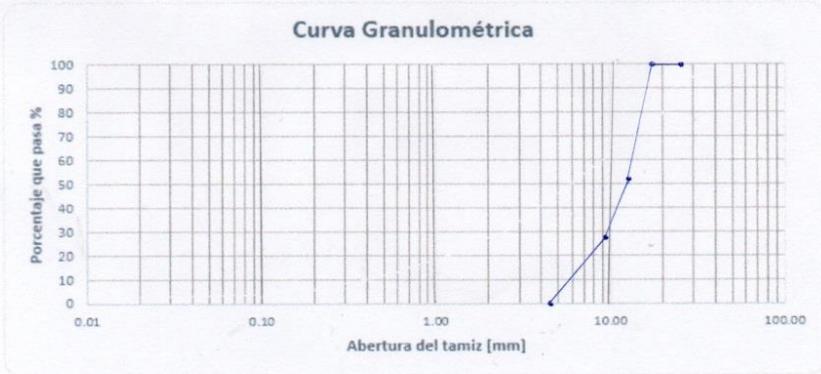


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido B (agregado 5/8)  
 FECHA 23/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.00	8.00	8.00	0.16	99.84	
1/2"	12.50	2431.00	2439.00	43.78	51.22	
3/8"	9.50	1260.00	3699.00	73.98	26.02	
N. 4	4.75	1301.00	5000.00	100.00	0.00	
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N. 16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297					
N. 60	0.246					
N. 80	0.177					
N. 100	0.149					
N. 200	0.074					
PASA #200						
TOTAL		5000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g                      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g                      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 15. Granulometría Árido B – 5.

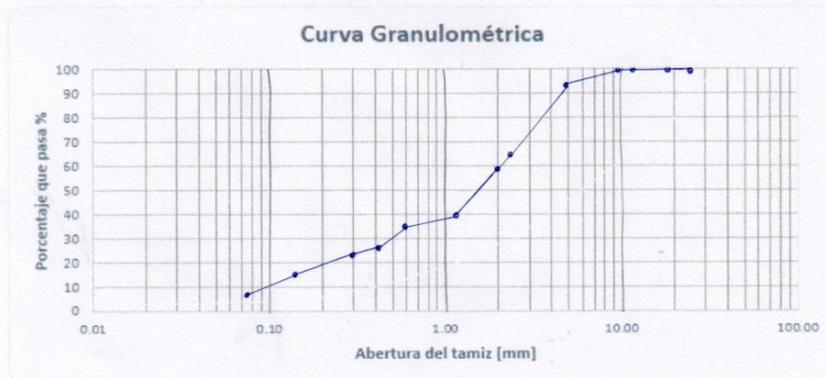


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido C (agregado 3/16)  
 FECHA 25/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	85.60	85.60	4.28	95.72	
N. 8	2.38	590.80	676.40	33.82	66.18	
N. 10	2.00	139.20	815.60	40.78	59.22	
N. 16	1.19	387.00	1202.60	60.13	39.87	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	71.20	1273.80	63.69	36.31	
N. 40	0.42	187.00	1460.80	73.04	26.96	
N. 50	0.297	85.60	1546.40	77.32	22.68	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	106.80	1655.20	82.76	17.24	
N. 200	0.074	185.80	1841.00	92.05	7.95	
PASA #200		159.00	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} + D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 16. Granulometría Árido C – 1.

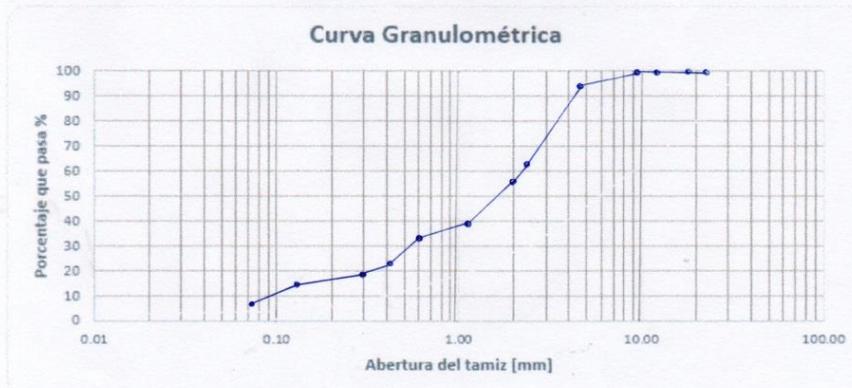


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Arido C (agregado 3/16)  
 FECHA 25/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	81.40	81.40	4.07	95.93	
N. 8	2.38	656.60	738.00	36.90	63.10	
N. 10	2.00	126.00	864.00	43.20	56.80	
N.16	1.19	338.40	1202.40	60.12	39.88	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	113.40	1315.80	65.79	34.21	
N. 40	0.42	227.00	1542.80	77.14	22.86	
N. 50	0.297	74.40	1617.20	80.86	19.14	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	89.20	1706.40	85.32	14.68	
N. 200	0.074	164.40	1870.80	93.54	6.46	
PASA #200		129.20	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 17. Granulometría Arido C – 2.

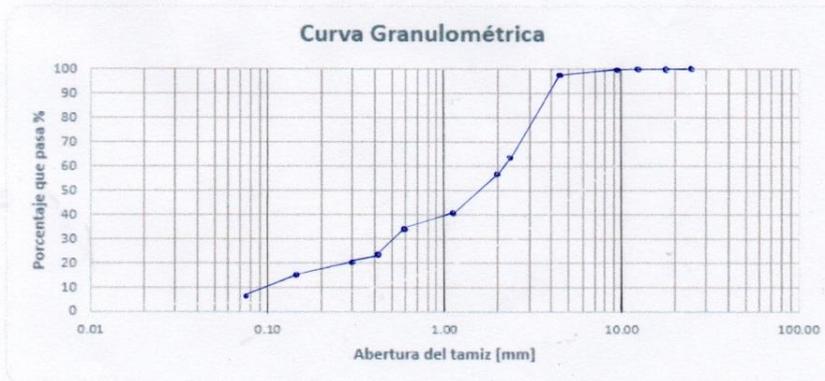


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido C (agregado 3/16)  
 FECHA 25/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	32.00	32.00	1.60	98.40	
N. 8	2.38	654.80	686.80	34.34	65.66	
N. 10	2.00	146.60	833.40	41.67	58.33	
N.16	1.19	346.00	1179.40	58.97	41.03	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	125.00	1304.40	65.22	34.78	
N. 40	0.42	220.60	1525.00	76.25	23.75	
N. 50	0.297	75.20	1600.20	80.01	19.99	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	90.20	1690.40	84.52	15.48	
N. 200	0.074	176.20	1866.60	93.33	6.67	
PASA #200		133.40	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 18. Granulometría Árido C – 3.



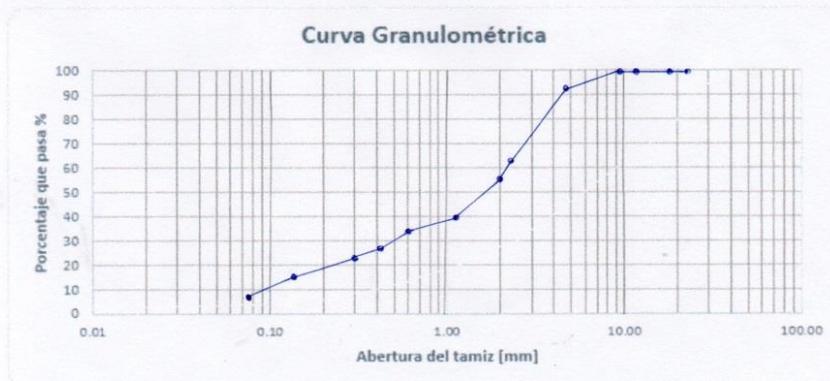


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido C (agregado 3/16)  
 FECHA 25/septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	111.60	111.60	5.58	94.42	
N. 8	2.38	587.60	699.20	34.96	65.04	
N. 10	2.00	160.20	859.40	42.97	57.03	
N.16	1.19	346.40	1205.80	60.29	39.71	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	106.20	1312.00	65.60	34.40	
N. 40	0.42	171.00	1483.00	74.15	25.85	
N. 50	0.297	75.60	1558.60	77.93	22.07	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	141.40	1670.00	83.50	16.50	
N. 200	0.074	178.40	1848.40	92.42	7.58	
PASA #200		151.60	2000.0	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g  
 PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 20. Granulometría Árido C – 5.

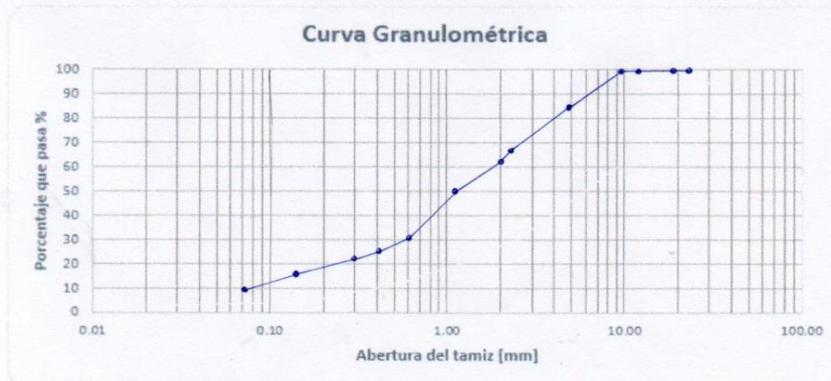


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido D (agregado arena)  
 FECHA 24/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	192.90	192.90	12.86	87.14	
N. 8	2.38	280.65	473.55	31.57	68.43	
N. 10	2.00	70.95	544.50	36.30	63.70	
N.16	1.19	147.90	692.40	46.16	53.84	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	310.80	1003.20	66.88	33.12	
N. 40	0.42	76.50	1079.70	71.98	28.02	
N. 50	0.297	60.30	1140.00	76.00	24.00	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	90.30	1230.30	82.02	17.98	
N. 200	0.074	93.15	1323.45	88.23	11.77	
PASA #200		176.55	1500.00	100.00	0.00	
TOTAL		1500.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	_____ mm
D30=	_____ mm
D60=	_____ mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	_____ mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	_____ mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	_____ mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Signature]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

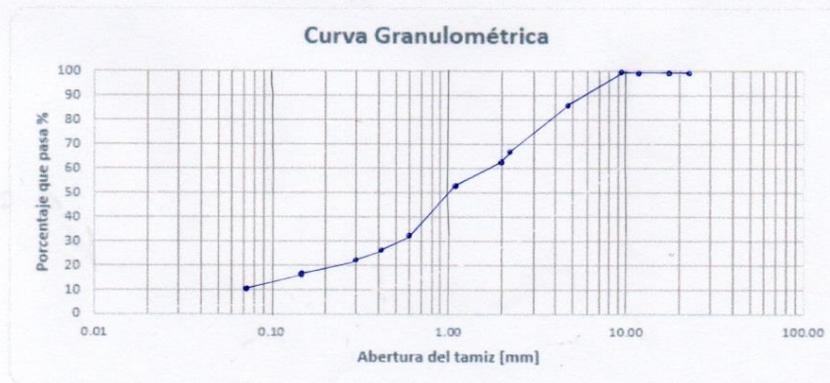
Anexo 21. Granulometría Árido D – 1.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos      **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque      Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido D (agregado arena)  
**FECHA:** 24/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	196.35	196.35	13.09	86.91	
N. 8	2.38	289.50	485.85	32.39	67.61	
N. 10	2.00	73.05	558.90	37.26	62.74	
N. 16	1.19	131.70	690.60	46.04	53.96	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	324.60	1015.20	67.68	32.32	
N. 40	0.42	86.40	1101.60	73.44	26.56	
N. 50	0.297	60.90	1162.50	77.50	22.50	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	85.05	1247.55	83.17	16.83	
N. 200	0.074	95.85	1343.40	89.56	10.44	
PASA #200		156.60	1500.00	100.00	0.00	
TOTAL		1500.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad =  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura =  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 22. Granulometría Árido D – 2.

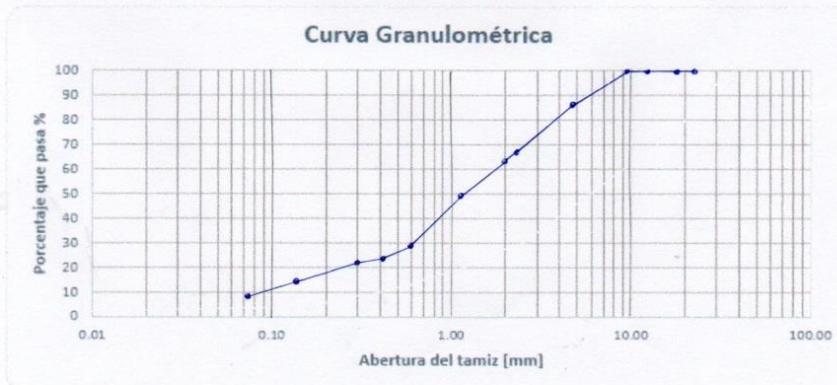


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido D (agregado arena)  
 FECHA 24/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	215.85	215.85	14.39	85.61	
N. 8	2.38	276.30	492.15	32.81	67.19	
N. 10	2.00	66.15	558.30	37.22	62.78	
N.16	1.19	196.50	754.80	50.32	49.68	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	300.75	1055.55	70.37	29.63	
N. 40	0.42	85.50	1141.05	76.07	23.93	
N. 50	0.297	42.30	1183.35	78.89	21.11	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	93.15	1276.50	85.10	14.90	
N. 200	0.074	87.45	1363.95	90.93	9.07	
PASA #200		136.05	1500.00	100.00	0.00	
TOTAL		1500.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 23. Granulometría Árido D – 3.

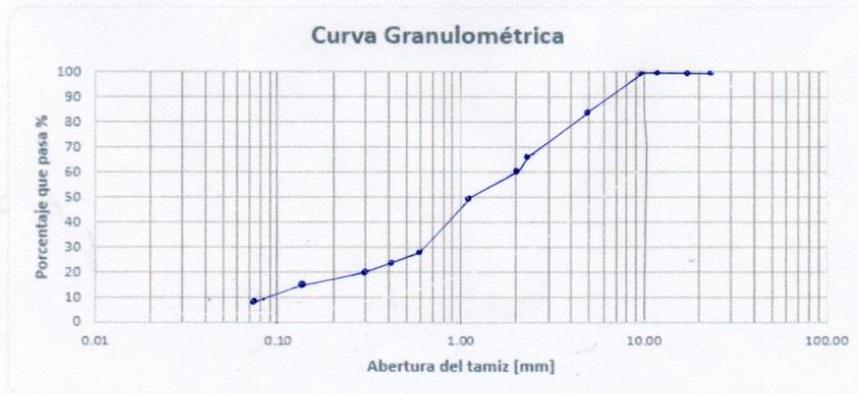


Fundada en 1867  
UNIVERSIDAD DE CUENCA

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido D (agregado arena)  
 FECHA 24/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	246.45	246.45	16.43	83.57	
N. 8	2.38	259.65	506.10	33.74	66.26	
N. 10	2.00	70.65	576.75	38.45	61.55	
N.16	1.19	180.00	756.75	50.45	49.55	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	321.00	1077.75	71.85	28.15	
N. 40	0.42	69.30	1147.05	76.47	23.53	
N. 50	0.297	35.70	1182.75	78.85	21.15	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	91.95	1274.70	84.98	15.02	
N. 200	0.074	89.10	1363.80	90.92	9.08	
PASA #200		136.20	1500.00	100.00	0.00	
TOTAL		1500.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

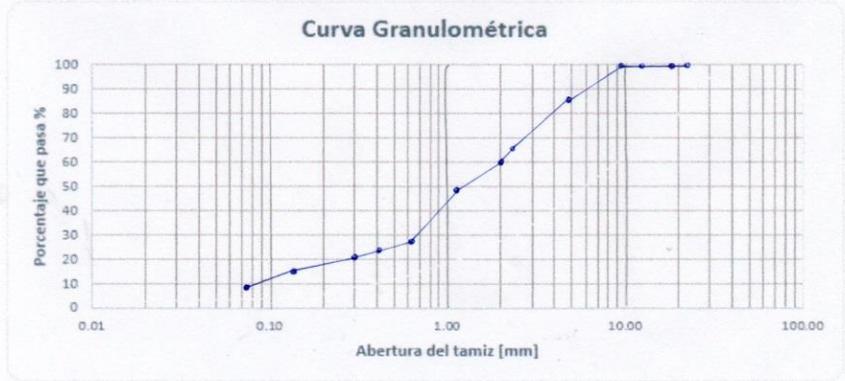
Anexo 24. Granulometría Árido D – 4.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos      **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido D (agregado arena)  
**FECHA:** 24/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	239.25	239.25	15.95	84.05	
N. 8	2.38	286.35	525.60	35.04	64.96	
N. 10	2.00	73.05	598.65	39.91	60.09	
N. 16	1.19	182.10	780.75	52.05	47.95	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	317.55	1098.30	73.22	26.78	
N. 40	0.42	57.30	1155.60	77.04	22.96	
N. 50	0.297	25.95	1181.55	78.77	21.23	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	89.55	1271.10	84.74	15.26	
N. 200	0.074	84.15	1355.25	90.35	9.65	
PASA #200		144.75	1300.00	100.00	0.00	
TOTAL		1500.00				

**PESO ANTES ENSAYO =** \_\_\_\_\_ g      **PESO ANTES LAVADO (seco) =** \_\_\_\_\_ g  
**PESO DESPUÉS ENSAYO =** \_\_\_\_\_ g      **PESO DESP. LAVADO (seco) =** \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 25. Granulometría Árido D – 5.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido A (agregado 3/8)  
 FECHA: 30/Septiembre/2020

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ARIDO FINO					
EJECUCIÓN DEL ENSAYO					
	Nomenclatura	Unidades	Valores		
			1	2	
Wp	Peso del Picnómetro	g	601.50	601.50	
Wv	Peso del Vidrio	g	303.80	298.30	
Wpva	Peso del Picnómetro + Peso Vidrio + Peso Agua	g	4475.20	4475.20	
A	Peso del Material Seco al Horno	g	1986.68	1983.68	
B	Peso del Picnómetro + Agua	g	4171.40	4176.90	
C	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra	g	5487.30	5484.70	
S	Peso Muestra SSS	g	2006.20	2002.60	
Yw1	Peso Específico del Agua T°C	g/cm³	1.00		
Yw2	Peso Específico del Agua T°C	g/cm³	1.00		

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS #1 Y #2**

**DENSIDAD RELATIVA**

1. Densidad Relativa SH (Gravedad Específica)	$SH = \frac{A}{B + S - C}$	#1 <u>2.878</u> g/cm³	#2 <u>2.855</u> g/cm³	<u>2.867</u> g/cm³
2. Densidad Relativa en Condición SSS	$SSS = \frac{S}{B + S - C}$	#1 <u>2.906</u> g/cm³	#2 <u>2.882</u> g/cm³	<u>2.894</u> g/cm³
3. Densidad Relativa Aparente en Condición SSS	$SSS = \frac{A}{B + A - C}$	#1 <u>2.962</u> g/cm³	#2 <u>2.935</u> g/cm³	<u>2.948</u> g/cm³

**DENSIDAD**

1. Densidad SH (Condición Seca al Horno)	$SH = \frac{997.5 * A}{B + S - C}$	#1 <u>2870.800</u> Kg/m³	#2 <u>2847.900</u> Kg/m³	<u>2859.350</u> Kg/m³
2. Densidad SSS	$SSS = \frac{997.5 * S}{B + S - C}$	#1 <u>2899.007</u> Kg/m³	#2 <u>2875.063</u> Kg/m³	<u>2887.035</u> Kg/m³
3. Densidad Aparente	$SSS = \frac{997.5 * A}{B + A - C}$	#1 <u>2954.342</u> Kg/m³	#2 <u>2927.621</u> Kg/m³	<u>2940.982</u> Kg/m³

**ABSORCIÓN**

1. Absorción	$\% = \frac{S - A}{A} * 100\%$	#1 <u>0.98</u> %	#2 <u>0.95</u> %	<u>0.97</u> %
--------------	--------------------------------	------------------	------------------	---------------



*[Handwritten Signature]*  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 26. Gravedad Específica y Absorción del Árido A.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido B (agregado 5/8)  
**FECHA:** 30/Septiembre/2020

**DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ARIDO GRUESO**

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	Unidades	Valores	
			1	2
Wp	Peso del Picnómetro	g	601.50	601.50
Wv	Peso del Vidrio	g	298.30	298.30
Wpva	Peso del Picnómetro + Peso Vidrio + Peso Agua	g	4475.20	4475.20
Wm	Peso del Picnómetro + Agua	g	4171.40	4176.90
W	Peso del Picnómetro + Agua + Material	g	5486.10	5491.10
A	Peso del Material Seco al Horno	g	1996.63	1993.09
B	Peso de la Muestra Superficialmente Seca	g	2013.20	2010.60
C	Peso Aparente en agua de la muestra Saturada	g	1314.70	1314.20
Yw1	Peso Específico del Agua	T°C	1.00	
Yw2	Peso Específico del Agua	T°C	1.00	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS #1 Y #2**

**DENSIDAD RELATIVA**

<b>1. Densidad Relativa SH</b> (Gravedad Específica)	$SH = \frac{A}{B - C}$	#1 <u>2.858</u> #2 <u>2.862</u>	g/cm <sup>3</sup> g/cm <sup>3</sup>	<u>2.860</u> g/cm <sup>3</sup>
<b>2. Densidad Relativa en Condición SSS</b>	$SSS = \frac{B}{B - C}$	#1 <u>2.882</u> #2 <u>2.887</u>	g/cm <sup>3</sup> g/cm <sup>3</sup>	<u>2.885</u> g/cm <sup>3</sup>
<b>3. Densidad Relativa Aparente en Condición SSS</b>	$SSS = \frac{A}{A - C}$	#1 <u>2.928</u> #2 <u>2.936</u>	g/cm <sup>3</sup> g/cm <sup>3</sup>	<u>2.932</u> g/cm <sup>3</sup>

**DENSIDAD**

<b>1. Densidad SH</b> (Condición Seca al Horno)	$SH = \frac{997.5 * A}{B - C}$	#1 <u>2851.308</u> #2 <u>2854.835</u>	Kg/m <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>	<u>2853.071</u> Kg/m <sup>3</sup>
<b>2. Densidad SSS</b>	$SSS = \frac{997.5 * B}{B - C}$	#1 <u>2874.971</u> #2 <u>2879.916</u>	Kg/m <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>	<u>2877.443</u> Kg/m <sup>3</sup>
<b>3. Densidad Aparente</b>	$SSS = \frac{997.5 * A}{A - C}$	#1 <u>2920.591</u> #2 <u>2928.467</u>	Kg/m <sup>3</sup> Kg/m <sup>3</sup>	<u>2924.529</u> Kg/m <sup>3</sup>

**ABSORCIÓN**

<b>1. Absorción</b>	$\% = \frac{B - A}{A} * 100\%$	#1 <u>0.830</u> #2 <u>0.879</u>	% %	<u>0.85</u> %
---------------------	--------------------------------	------------------------------------	--------	---------------



*[Handwritten Signature]*  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 27. Gravedad Específica y Absorción del Árido B.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido C (agregado 3/16)  
**FECHA:** 01/Octubre/2020

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO				
EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	Unidades	Valores	
			1	2
Wp	Peso del Picnómetro	g	601.50	601.50
Wv	Peso del Vidrio	g	303.80	298.30
Wpva	Peso del Picnómetro + Peso Vidrio + Peso Agua	g	4427.20	4425.20
A	Peso del Material Seco al Horno	g	2111.60	2109.00
B	Peso del Picnómetro + Agua	g	4123.40	4126.90
C	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra	g	5436.20	5419.70
S	Peso Muestra SSS	g	2139.90	2125.80
Yw1	Peso Específico del Agua	T°C	1.00	
Yw2	Peso Específico del Agua	T°C	1.00	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS #1 Y #2**

**DENSIDAD RELATIVA**

<b>1. Densidad Relativa SH</b> (Gravedad Específica)	$SH = \frac{A}{B + S - C}$	#1 <u>2.553</u>	g/cm <sup>3</sup>	<u>2.542</u> g/cm <sup>3</sup>
		#2 <u>2.532</u>	g/cm <sup>3</sup>	
<b>2. Densidad Relativa en Condición SSS</b>	$SSS = \frac{S}{B + S - C}$	#1 <u>2.587</u>	g/cm <sup>3</sup>	<u>2.570</u> g/cm <sup>3</sup>
		#2 <u>2.552</u>	g/cm <sup>3</sup>	
<b>3. Densidad Relativa Aparente en Condición SSS</b>	$SSS = \frac{A}{B + A - C}$	#1 <u>2.643</u>	g/cm <sup>3</sup>	<u>2.614</u> g/cm <sup>3</sup>
		#2 <u>2.584</u>	g/cm <sup>3</sup>	

**DENSIDAD**

<b>1. Densidad SH</b> (Condición Seca al Horno)	$SH = \frac{997.5 * A}{B + S - C}$	#1 <u>2546.634</u>	Kg/m <sup>3</sup>	<u>2536.059</u> Kg/m <sup>3</sup>
		#2 <u>2525.483</u>	Kg/m <sup>3</sup>	
<b>2. Densidad SSS</b>	$SSS = \frac{997.5 * S}{B + S - C}$	#1 <u>2580.764</u>	Kg/m <sup>3</sup>	<u>2563.183</u> Kg/m <sup>3</sup>
		#2 <u>2545.601</u>	Kg/m <sup>3</sup>	
<b>3. Densidad Aparente</b>	$SSS = \frac{997.5 * A}{B + A - C}$	#1 <u>2636.857</u>	Kg/m <sup>3</sup>	<u>2607.161</u> Kg/m <sup>3</sup>
		#2 <u>2577.466</u>	Kg/m <sup>3</sup>	

**ABSORCIÓN**

<b>1. Absorción</b>	$\% = \frac{S - A}{A} * 100\%$	#1 <u>1.34</u>	%	<u>1.07</u> %
		#2 <u>0.80</u>	%	



*[Signature]*  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 28. Gravedad Específica y Absorción del Árido C.



PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido D (agregado arena)  
 FECHA: 01/Octubre/2020

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO					
EJECUCIÓN DEL ENSAYO					
	Nomenclatura	Unidades	Valores		
			1	2	
Wp	Peso del Picnómetro	g	601.50	601.50	
Wv	Peso del Vidrio	g	303.80	298.30	
Wpva	Peso del Picnómetro + Peso Vidrio + Peso Agua	g	4427.20	4425.20	
A	Peso del Material Seco al Horno	g	2147.50	2113.00	
B	Peso del Picnómetro + Agua	g	4123.40	4126.90	
C	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra	g	5471.30	5448.90	
S	Peso Muestra SSS	g	2163.20	2119.40	
Yw1	Peso Específico del Agua	T°C	1.00		
Yw2	Peso Específico del Agua	T°C	1.00		

CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS #1 Y #2

DENSIDAD RELATIVA

- Densidad Relativa SH (Gravedad Específica)  $SH = \frac{A}{B + S - C}$  #1  $\frac{2.634}{2.650}$  g/cm<sup>3</sup> #2  $\frac{2.634}{2.650}$  g/cm<sup>3</sup> 2.642 g/cm<sup>3</sup>
- Densidad Relativa en Condición SSS  $SSS = \frac{S}{B + S - C}$  #1  $\frac{2.653}{2.658}$  g/cm<sup>3</sup> #2  $\frac{2.653}{2.658}$  g/cm<sup>3</sup> 2.656 g/cm<sup>3</sup>
- Densidad Relativa Aparente en Condición SSS  $SSS = \frac{A}{B + A - C}$  #1  $\frac{2.686}{2.671}$  g/cm<sup>3</sup> #2  $\frac{2.686}{2.671}$  g/cm<sup>3</sup> 2.679 g/cm<sup>3</sup>

DENSIDAD

- Densidad SH (Condición Seca al Horno)  $SH = \frac{997.5 * A}{B + S - C}$  #1  $\frac{2627.415}{2643.237}$  Kg/m<sup>3</sup> #2  $\frac{2627.415}{2643.237}$  Kg/m<sup>3</sup> 2635.326 Kg/m<sup>3</sup>
- Densidad SSS  $SSS = \frac{997.5 * S}{B + S - C}$  #1  $\frac{2646.623}{2651.243}$  Kg/m<sup>3</sup> #2  $\frac{2646.623}{2651.243}$  Kg/m<sup>3</sup> 2648.933 Kg/m<sup>3</sup>
- Densidad Aparente  $SSS = \frac{997.5 * A}{B + A - C}$  #1  $\frac{2679.004}{2664.624}$  Kg/m<sup>3</sup> #2  $\frac{2679.004}{2664.624}$  Kg/m<sup>3</sup> 2671.814 Kg/m<sup>3</sup>

ABSORCIÓN

- Absorción  $\% = \frac{S - A}{A} * 100\%$  #1  $\frac{0.73}{0.30} * 100\%$  % #2  $\frac{0.73}{0.30} * 100\%$  % 0.52 %



*[Signature]*  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 29. Gravedad Específica y Absorción del Árido D.



**EP - PETROECUADOR  
INFORME DE RESULTADOS**



Laboratorio de ensayo acreditado por el SAE con  
ACREDITACIÓN No. SAE LEN 13-002.

GERENCIA: GERENCIA DE REFINACION REFERENCIA: PROPRQ # 01 (2019-11-03)  
ORGANIZACIÓN: M01\_REFINERÍA ESMERALDAS PRODUCTO ANALIZADO: 0280 ASFALTO AC-20  
INFORME NO. M01-1081-2019 CODIGO MUESTRA: ECC-19-1930

DATOS CLIENTE	
NOMBRE	JEFE DE CONTROL Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN (ING. ALEJANDRO CAMACHO Y.)
DIRECCIÓN	Km 7 1/2 Antigua Vía Atacames.
TELÉFONO	062994000 (80004)
SOLICITADO POR	ING. MAURICIO GAVILANES ESP. DE CONTROL Y PROGRAMACION DE LA PRODUCCION

DATOS DE LA MUESTRA			
ORIGEN DE LA MUESTRA	AO-V08	HORA TOMA DE MUESTRA	23:20:13
FECHA DE TOMA DE MUESTRA	2019/11/02	CANTIDAD DE MUESTRA	2700 ml
FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	2019/11/02	HORA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA	23:30:13
LUGAR TOMA DE MUESTRA	ASFALTOS	PUNTO DE MUESTREO	AFORO DE TANQUE

DATOS DE ANÁLISIS			
TEMPERATURA AMBIENTE	23.6 °C	PRESION BAROMETRICA	100.9 kPa
HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE	60.7 %HR	FECHA DE INICIO DE LOS ENSAYOS	2019/11/02 23:35:13
FECHA DE EMISIÓN DEL INFORME	2019/11/03	FECHA FINALIZACION DE LOS ENSAYOS	2019/11/03 06:10:13

PARÁMETRO	MÉTODO		ESPECIFICACIÓN <sup>(1)</sup>		RESULTADO	UNIDAD DE MEDIDA	U <sup>(2)</sup>
	(ASTM_INEN)	INTERNO	MÍN.	MÁX.			
VISCOSIDAD ABSOLUTA 140 °F (60 °C)	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	160	240	167,0	Pa s	±5 %
VISCOSIDAD CINEMÁTICA 275 °F (135 °C)	ASTM D2170_NTE INEN 810/1981	V03.06.01.03-T-23	300	-	358,0	mm <sup>2</sup> /s	±1.9 %
PENETRACIÓN 77 °F (25 °C 100 G. 5s)	ASTM D5_NTE INEN 918	V03.06.01.03-T-20	60	-	80	dmm	±4 dmm
PUNTO DE INFLAMACION	ASTM D92_NTE INEN 808	V03.06.01.03-T-21	232	-	288	°C	±4 °C
SOLUBILIDAD EN TRICLOROETILENO*	ASTM D2042_NTE INEN 915	V03.06.01.03-T-31	99	-	99,90	%P	-
RESIDUO DE ENSAYOS DE PELÍCULA FINA EN HORNO ROTATORIO*	N/A	V03.06.01.03-T-30	N/A	N/A	NA	-	-
VISCOSIDAD 60 °C*	ASTM D2171_NTE INEN 810	V03.06.01.03-T-22	-	800	678,0	Pa s	±NA
DUCTILIDAD 77 °F (25 °C) 5cm/min*	ASTM D113_NTE INEN 916	V03.06.01.03-T-24	50	-	67,0	cm	-
GRAVEDAD API A 60 °F (15.6 °C)	ASTM D1298_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	7,0	°API	±NA
DENSIDAD RELATIVA (15.6/15.6 °C)	ASTM D1296_NTE INEN 2319	V03.06.01.03-T-04	REPORTE	REPORTE	1,0217	-	±NA
GRAVEDAD ESPECÍFICA 25/25 °C	ASTM 70	V03.06.01.03-T-57	REPORTE	REPORTE	1,010	-	±0.002
PUNTO DE ABLANDAMIENTO*	ASTM D36		-	-	47,0	°C	-
INDICE DE PENETRACION*	ASTM D5		-1.5	1	-0,8	-	-
CAMBIO DE MASA*	ASTM D2872	V03.06.01.03-T-30	-	1	-0,230	%P	-
*API OBSERVADO: 13.436							
TEMPERATURA OBSERVADA: 85.4 °C							
OBSERVACIONES:							

ESPECIALISTA DE CONTROL DE CALIDAD  
HIDROCARBUROS  
DEPARTAMENTO DE LABORATORIO  
Y CONTROL DE CALIDAD  
REFINERÍA ESMERALDAS

CERTIFICADO: Que el contenido del documento es correcto y se encuentra en el archivo del Departamento de Laboratorio y Control de Calidad

03 NOV 2019

DEPARTAMENTO DE LABORATORIO  
Y CONTROL DE CALIDAD  
REFINERÍA ESMERALDAS

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

AUTORIZADO POR: ING. GRACIELA HURTADO MERA  
ESPECIALISTA DE CONTROL DE CALIDAD  
HIDROCARBUROS ENC.

NOTAS: INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE: NO APLICA  
Los resultados de este informe corresponden únicamente a las propiedades de la muestra analizada en el laboratorio.  
Los resultados se aplican únicamente a la muestra como se recibió.  
Sin la aprobación del Especialista y/o Jefe de Control de Calidad, no se deberá reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad.  
Los ensayos marcados con (\*) NO están dentro del alcance de la acreditación del SAE.  
Los resultados de los ensayos realizados a la muestra son de responsabilidad del Laboratorio RE, excepto si la información es suministrada por el cliente y esta afecte la validez de los resultados; esto se detallará en observaciones.  
(1) Referido a la Norma INEN: NTE 2515-2014 Enmienda 1  
(2) La U es estimación multiplicando la U típica por el factor de cobertura k=2 (95% nivel de confianza).

Dirección Organización: Km 7 1/2 VÍA ATACAMES S/N - teléfono: (593)06 2994000 - extensiones: 85450 - 85455 - 85457 - 85453 - ESMERALDAS-ECUADOR

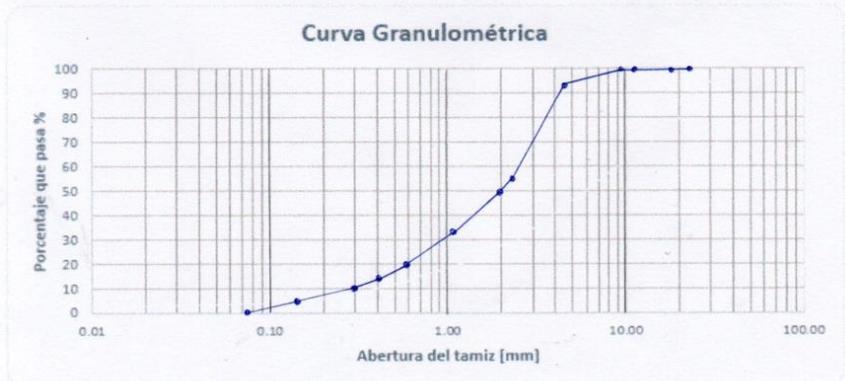




PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido E (agregado vidrio)  
 FECHA 28/septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	126.70	126.70	6.34	93.67	
N. 8	2.38	771.89	898.59	44.93	55.07	
N. 10	2.00	129.37	1027.96	51.40	48.60	
N. 16	1.19	304.94	1332.90	66.65	33.36	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	279.36	1612.26	80.61	19.39	
N. 40	0.42	109.27	1721.53	86.08	13.92	
N. 50	0.297	73.95	1795.48	89.77	10.23	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	124.74	1920.22	96.01	3.99	
N. 200	0.074	70.83	1991.05	99.55	0.45	
PASA #200		8.95	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

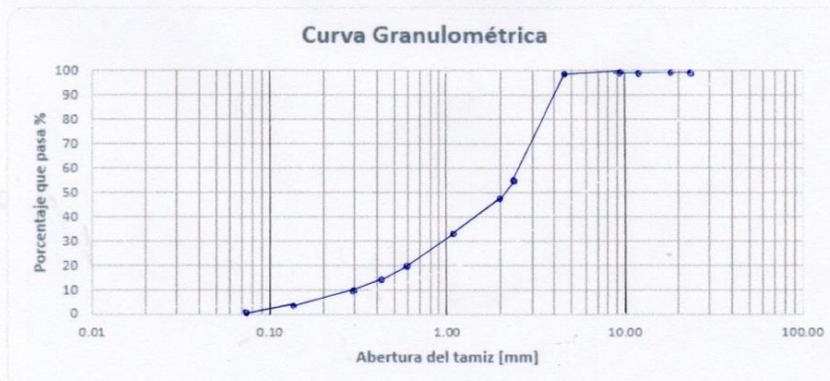
Anexo 32. Granulometría Árido E - 2.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque **Yessenia Pinos**  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Árido E (agregado vidrio)  
**FECHA:** 28/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	18.95	18.95	0.95	99.05	
N. 8	2.38	886.20	905.15	45.26	54.74	
N. 10	2.00	117.69	1022.84	51.14	48.86	
N.16	1.19	319.75	1342.59	67.13	32.87	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	276.25	1618.84	80.94	19.06	
N. 40	0.42	108.12	1726.96	86.35	13.65	
N. 50	0.297	76.33	1803.29	90.16	9.84	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	126.27	1929.56	96.48	3.52	
N. 200	0.074	52.60	1982.16	99.11	0.89	
PASA #200		17.84	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g                      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g                      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
  
 Practicas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 33. Granulometría Árido E – 3.

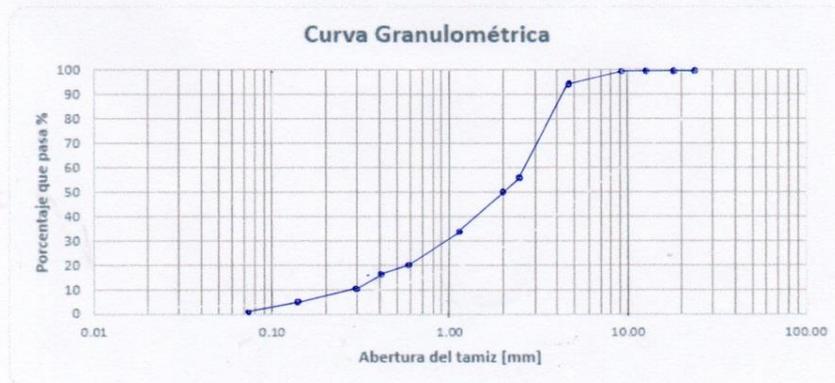


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido E (agregado vidrio)  
 FECHA 28/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75	107.64	107.64	5.38	94.62	
N. 8	2.38	761.32	868.96	43.45	56.55	
N. 10	2.00	128.96	997.92	49.90	50.10	
N. 16	1.19	310.03	1307.95	65.40	34.60	
N. 20	0.84	—	—	—	—	
N. 30	0.59	291.95	1599.90	80.00	20.01	
N. 40	0.42	114.10	1714.00	85.70	14.30	
N. 50	0.297	79.76	1793.76	89.69	10.31	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	127.36	1921.12	96.06	3.94	
N. 200	0.074	70.30	1991.42	99.57	0.43	
PASA #200		8.58	2000.00	100.00	0.00	
TOTAL		2000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 34. Granulometría Árido E – 4.





Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido E (agregado vidrio)  
 FECHA 02/Octubre/2020

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ARIDO FINO				
EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	Unidades	Valores	
			1	2
Wp	Peso del Picnómetro	g	464.62	464.62
Wv	Peso del Vidrio	g	599.92	599.92
Wpva	Peso del Picnómetro + Peso Vidrio + Peso Agua	g	3503.00	3503.00
A	Peso del Material Seco al Horno	g	1979.00	1978.00
B	Peso del Picnómetro + Agua	g	2903.08	2903.08
C	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra	g	4050.08	4049.08
S	Peso Muestra SSS	g	2145.27	2145.81
Yw1	Peso Específico del Agua T°C	g/cm³	1.00	
Yw2	Peso Específico del Agua T°C	g/cm³	1.00	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS #1 Y #2**

**DENSIDAD RELATIVA**

- Densidad Relativa SH**  
(Gravedad Específica)

$$SH = \frac{A}{B + S - C}$$

#1	<u>1.982</u>	g/cm³	<u>1.980</u> g/cm³
#2	<u>1.978</u>	g/cm³	
- Densidad Relativa en Condición SSS**

$$SSS = \frac{S}{B + S - C}$$

#1	<u>2.149</u>	g/cm³	<u>2.148</u> g/cm³
#2	<u>2.146</u>	g/cm³	
- Densidad Relativa Aparente en Condición SSS**

$$SSS = \frac{A}{B + A - C}$$

#1	<u>2.379</u>	g/cm³	<u>2.378</u> g/cm³
#2	<u>2.377</u>	g/cm³	

**DENSIDAD**

- Densidad SH**  
(Condición Seca al Horno)

$$SH = \frac{997.5 * A}{B + S - C}$$

#1	<u>1977.474</u>	Kg/m³	<u>1975.452</u> Kg/m³
#2	<u>1973.430</u>	Kg/m³	
- Densidad SSS**

$$SSS = \frac{997.5 * S}{B + S - C}$$

#1	<u>2143.615</u>	Kg/m³	<u>2142.234</u> Kg/m³
#2	<u>2140.852</u>	Kg/m³	
- Densidad Aparente**

$$SSS = \frac{997.5 * A}{B + A - C}$$

#1	<u>2372.659</u>	Kg/m³	<u>2372.060</u> Kg/m³
#2	<u>2371.460</u>	Kg/m³	

**ABSORCIÓN**

- Absorción**

$$\% = \frac{S - A}{A} * 100\%$$

#1	<u>8.40</u>	%	<u>8.44</u> %
#2	<u>8.48</u>	%	



*[Handwritten Signature]*  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 36. Gravedad Específica y Absorción del Árido E.

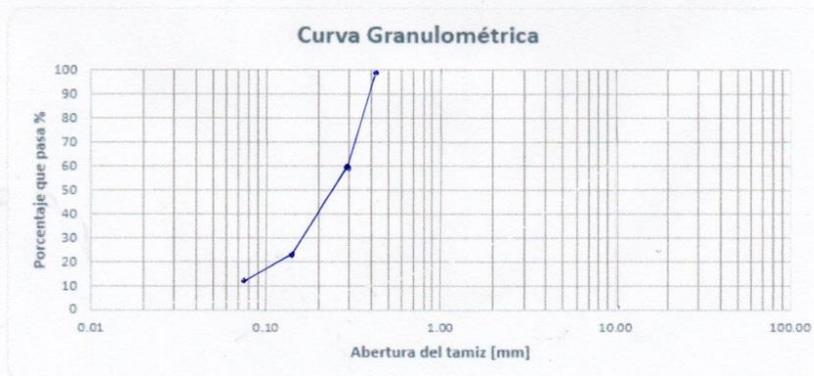


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido F (agregado cal)  
 FECHA 29/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75					
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N.16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297	396.50	396.50	39.65	60.35	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	365.50	762.00	76.20	23.80	
N. 200	0.074	121.00	883.00	88.30	11.70	
PASA #200		117.00	1000.00	100.00	0.00	
TOTAL		1000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

Coefficiente de Uniformidad=  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$

Coefficiente de Curvatura=  $C_c = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 37. Granulometría Árido F – 1.



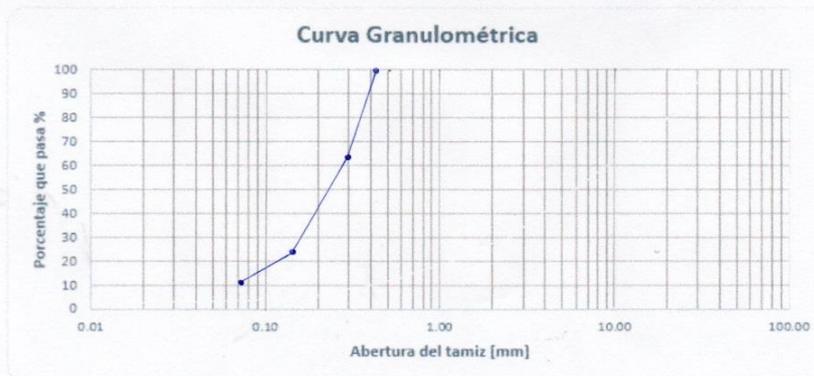


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido F (árido cal)  
 FECHA 29/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75					
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N.16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297	374.50	374.50	37.45	62.55	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	369.40	763.90	76.39	23.61	
N. 200	0.074	128.30	892.20	89.22	10.78	
PASA #200		107.80	1000.00	100.00	0.00	
TOTAL		1000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} \cdot D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
 Facultad de Ingeniería  
 Prácticas de Laboratorio  
 Laboratorio de Suelos

Anexo 39. Granulometría Árido F – 3.

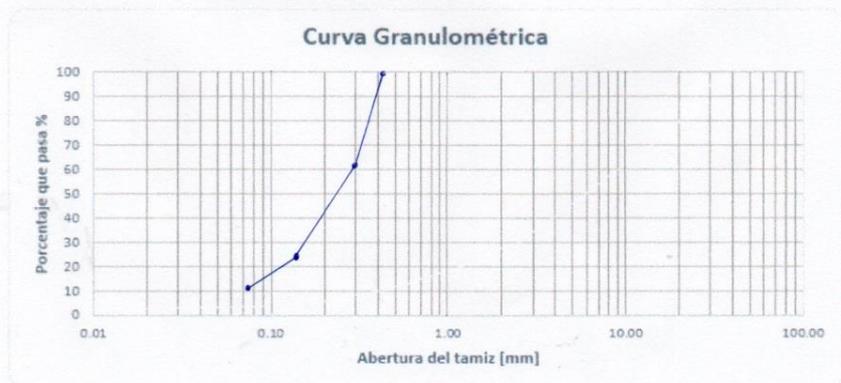


Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido F (agregado cal)  
 Yessenia Pinos  
 FECHA 29/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75					
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N. 16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297	385.30	385.30	38.53	61.47	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	355.60	740.90	74.09	25.91	
N. 200	0.074	146.90	887.80	88.78	11.22	
PASA #200		112.20	1000.00	100.00	0.00	
TOTAL		1000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ gm  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ gm  
 PESO ANTES LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ gm  
 PESO DESP. LAVADO (seco) = \_\_\_\_\_ gm



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS	
Diámetro Efectivo	
D10=	mm
Coeficiente de Uniformidad	
Cu=	mm
Coeficiente de Curvatura	
Cc=	mm

Coeficiente de Uniformidad =  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura =  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} + D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

F.C

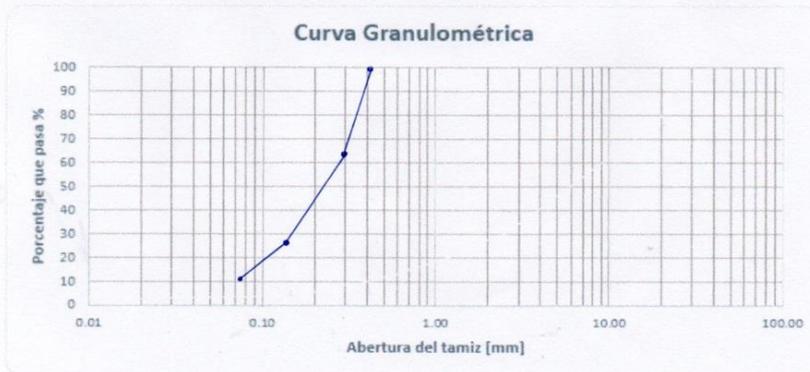
Anexo 40. Granulometría Árido F – 4.



PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Árido F (agregado cal)  
 FECHA: 29/Septiembre/2020

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						ASTM C 136-09
TAMIZ #.	ABERTURA mm	PESO RETEN. g	P. RET. ACUM g	% RETENIDO	% PASA	% ESPECÍFICO
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N. 4	4.75					
N. 8	2.38					
N. 10	2.00					
N.16	1.19					
N. 20	0.84					
N. 30	0.59					
N. 40	0.42					
N. 50	0.297	368.50	368.50	36.85	63.15	
N. 60	0.246	—	—	—	—	
N. 80	0.177	—	—	—	—	
N. 100	0.149	373.50	742.00	74.20	25.80	
N. 200	0.074	144.60	886.60	88.66	11.34	
PASA #200		113.40	1000.00	100.00	0.00	
TOTAL		1000.00				

PESO ANTES ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO ANTES LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g  
 PESO DESPUÉS ENSAYO = \_\_\_\_\_ g      PESO DESP. LAVADO (seco)= \_\_\_\_\_ g



Datos de la Gráfica	
D10=	mm
D30=	mm
D60=	mm

RESULTADOS		
Diámetro Efectivo		
D10=		mm
Coeficiente de Uniformidad		
Cu=		mm
Coeficiente de Curvatura		
Cc=		mm

Coeficiente de Uniformidad=  $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$   
 Coeficiente de Curvatura=  $Cc = \frac{D_{30}^2}{(D_{60} * D_{10})}$

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería  
*[Firma]*  
Prácticas de Laboratorio  
Laboratorio de Suelos

Anexo 41. Granulometría Árido F – 5.



Tamiz	Tamiz mm	3/8		5/8		3/16		ARENA		CAL		Granulometría Combinada	Media	Especificaciones		Error
		ARIDO A		ARIDO B		ARIDO C		ARIDO D		Arido F				Lim. Inferior	Lim. Superior	
		% Pasa	8.00	% Pasa	40.00	% Pasa	11.00	% Pasa	40.00	% Pasa	1.00					
1"	25	100.00	8.00	100.00	40.00	100.00	11.00	100.00	40.00	100.00	1	100.00	100	100	100	0.00
3/4"	19	100.00	8.00	99.74	39.90	100.00	11.00	100.00	40.00	100.00	1	99.90	95	90	100	-4.90
1/2"	12.5	99.96	8.00	52.00	20.80	100.00	11.00	100.00	40.00	100.00	1	80.80	76	67	85	-4.80
3/8"	9.5	99.84	7.99	28.85	11.54	100.00	11.00	100.00	40.00	100.00	1	71.53	68	56	80	-3.53
#4	4.75	11.50	0.92	0.00	0.00	96.59	10.62	85.46	34.18	100.00	1	46.73	50	35	65	3.27
#8	2.38	1.78	0.14	0.00	0.00	65.44	7.20	66.89	26.76	100.00	1	35.10	36	23	49	0.90
#10	2	1.19	0.10	0.00	0.00	58.01	6.38	62.17	24.87	100.00	1	32.34	32.5	20	45	0.16
#16	1.19	0.58	0.05	0.00	0.00	40.00	4.40	51.00	20.40	100.00	1	25.85	26	15	37	0.15
#30	0.59	0.16	0.01	0.00	0.00	35.00	3.85	30.00	12.00	100.00	1	16.86	17	8	26	0.14
#40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	2.75	25.00	10.00	100.00	1	13.75	14	6	22	0.25
#50	0.297	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	2.31	22.00	8.80	62.28	0.62	11.73	12	5	19	0.27
#100	0.149	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	1.76	16.00	6.40	24.70	0.25	8.41	8.5	3	14	0.09
#200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	0.77	10.00	4.00	11.30	0.11	4.88	5	2	8	0.12
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00

Anexo 42. Combinación Teórica con Muestra Patrón.

% Retenido	P.RetenidoAcum	Peso Retenido[g]	3/8		5/8		3/16		ARENA		CAL	
			ARIDO A	8.00%	ARIDO B	40.00%	ARIDO C	11.00%	ARIDO D	40.00%	Arido F	1.00%
0.00	0.00	0.00										
0.10	1.31	1.31				1.31						
19.20	242.34	241.03	29.10			211.93						
28.47	359.33	116.98	22.02			94.96						
53.27	672.28	312.95	20.03			171.94		25.11		95.87		
64.90	819.08	146.80	9.80					30.05		106.95		
67.66	853.81	34.74	5.36					10.03		19.35		
74.15	935.82	82.00	4.02					15.80		62.18		
83.14	1049.19	113.37	3.37					10.01		99.99		
86.25	1088.48	39.28	2.33					7.32		29.63		
88.27	1113.93	25.46						7.09		14.48		3.89
91.59	1155.90	41.97						12.88		25.05		4.04
95.12	1200.38	44.47						13.75		26.65		4.07
100.00	1262.00	61.62										

Anexo 43. Detalle de la Combinación Patrón.

Tamiz	Tamiz mm	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL		Granulometría Combinada	Media	Especificaciones		Error
		ARIDO A		ARIDO B		ARIDO C		ARIDO D		ARIDO E		Arido F				Lim. Inferior	Lim. Superior	
		% Pasa	6.00	% Pasa	40.00	% Pasa	10.00	% Pasa	38.00	% Pasa	5.00	% Pasa	1.00					
1"	25	100.00	6.00	100.00	40.00	100.00	10.00	100.00	38.00	100.00	5.00	100.00	1	100.00	100	100	100	0.00
3/4"	19	100.00	6.00	99.74	39.90	100.00	10.00	100.00	38.00	100.00	5.00	100.00	1	99.90	95	90	100	-4.90
1/2"	12.5	99.96	6.00	52.00	20.80	100.00	10.00	100.00	38.00	100.00	5.00	100.00	1	80.80	76	67	85	-4.80
3/8"	9.5	99.84	5.99	28.85	11.54	100.00	10.00	100.00	38.00	100.00	5.00	100.00	1	71.53	68	56	80	-3.53
#4	4.75	11.50	0.69	0.00	0.00	96.59	9.66	85.46	32.47	95.11	4.76	100.00	1	48.58	50	35	65	1.42
#8	2.38	1.78	0.11	0.00	0.00	65.44	6.54	66.89	25.42	54.46	2.72	100.00	1	35.79	36	23	49	0.21
#10	2	1.19	0.07	0.00	0.00	58.01	5.80	62.17	23.62	48.09	2.40	100.00	1	32.90	32.5	20	45	-0.40
#16	1.19	0.58	0.03	0.00	0.00	40.00	4.00	51.00	19.38	32.62	1.63	100.00	1	26.05	26	15	37	-0.05
#30	0.59	0.16	0.01	0.00	0.00	35.00	3.50	30.00	11.40	18.78	0.94	100.00	1	16.85	17	8	26	0.15
#40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	2.50	25.00	9.50	16.00	0.80	100.00	1	13.80	14	6	22	0.20
#50	0.297	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	2.10	22.00	8.36	13.00	0.65	62.28	0.62	11.73	12	5	19	0.27
#100	0.149	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	1.60	16.00	6.08	8.00	0.40	24.70	0.25	8.33	8.5	3	14	0.17
#200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	0.70	10.00	3.80	3.00	0.15	11.30	0.11	4.76	5	2	8	0.24
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00

Anexo 44. Combinación Teórica con 5% de Vidrio.



% Retenido	P.RetenidoAcum	Peso Retenido [g]	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL	
			ARIDO A	6.00%	ARIDO B	40.00%	ARIDO C	10.00%	ARIDO D	38.00%	ARIDO E	5.00%	ARIDO F	1.00%
0.00	0.00	0.00												
0.10	1.31	1.31			1.31									
19.20	242.03	240.72	19.38		221.34									
28.47	358.83	116.80	12.23		104.57									
51.42	648.11	289.28	10.17		152.93		29.22		84.35		12.61			
64.21	809.28	161.17	10.05				27.32		110.49		13.31			
67.10	845.72	36.43	5.70				6.18		21.41		3.15			
73.95	932.13	86.41	8.79				14.65		55.66		7.32			
83.15	1048.05	115.92	3.79				15.07		87.23		9.82			
86.20	1086.47	38.43	1.91				6.51		22.75		7.25			
88.27	1112.53	26.06					4.83		16.43		2.02			2.78
91.67	1155.46	42.93					7.95		28.21		2.37			4.40
95.24	1200.38	44.92					8.32		29.61		2.16			4.83
100.00	1260.41	60.03												

Anexo 45. Detalle de la Combinación con 5% de Vidrio.

Tamiz	Tamiz mm	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL		Granulometría Combinada	Media	Especificaciones		Error
		ARIDO A		ARIDO B		ARIDO C		ARIDO D		ARIDO E		Arido F				Lim. Inferior	Lim. Superior	
		% Pasa	4.00	% Pasa	40.00	% Pasa	8.00	% Pasa	37.00	% Pasa	10.00	% Pasa	1.00					
1"	25	100.00	4.00	100.00	40.00	100.00	8.00	100.00	37.00	100.00	10.00	100.00	1	100.00	100	100	100	0.00
3/4"	19	100.00	4.00	99.74	39.90	100.00	8.00	100.00	37.00	100.00	10.00	100.00	1	99.90	95	90	100	-4.90
1/2"	12.5	99.96	4.00	52.00	20.80	100.00	8.00	100.00	37.00	100.00	10.00	100.00	1	80.80	76	67	85	-4.80
3/8"	9.5	99.84	3.99	28.85	11.54	100.00	8.00	100.00	37.00	100.00	10.00	100.00	1	71.53	68	56	80	-3.53
#4	4.75	11.50	0.46	0.00	0.00	96.59	7.73	85.46	31.62	95.11	9.51	100.00	1	50.32	50	35	65	-0.32
#8	2.38	1.78	0.07	0.00	0.00	65.44	5.24	66.89	24.75	54.46	5.45	100.00	1	36.50	36	23	49	-0.50
#10	2	1.19	0.05	0.00	0.00	58.01	4.64	62.17	23.00	48.09	4.81	100.00	1	33.50	32.5	20	45	-1.00
#16	1.19	0.58	0.02	0.00	0.00	40.00	3.20	51.00	18.87	32.62	3.26	100.00	1	26.35	26	15	37	-0.35
#30	0.59	0.16	0.01	0.00	0.00	35.00	2.80	30.00	11.10	18.78	1.88	100.00	1	16.78	17	8	26	0.22
#40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	2.00	25.00	9.25	16.00	1.60	100.00	1	13.85	14	6	22	0.15
#50	0.297	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	1.68	22.00	8.14	13.00	1.30	62.28	0.62	11.74	12	5	19	0.26
#100	0.149	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	1.28	16.00	5.92	8.00	0.80	24.70	0.25	8.25	8.5	3	14	0.25
#200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	0.56	10.00	3.70	3.00	0.30	11.30	0.11	4.67	5	2	8	0.33
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00

Anexo 46. Combinación Teórica con 10% de Vidrio.

% Retenido	P.RetenidoAcum	Peso Retenido [g]	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL	
			ARIDO A	4.00%	ARIDO B	40.00%	ARIDO C	8.00%	ARIDO D	37.00%	ARIDO E	10.00%	ARIDO F	1.00%
0.00	0.00	0.00												
0.10	1.31	1.31			1.31									
19.20	241.79	240.48	16.86		223.62									
28.47	358.45	116.66	6.23		110.43									
49.68	625.60	267.15	6.79		144.79		21.10		67.90		26.57			
63.50	799.58	173.98	6.80				23.18		115.51		28.49			
66.50	837.38	37.80	1.56				5.12		23.70		7.41			
73.65	927.36	89.98	3.10				11.12		62.51		13.25			
83.22	1047.86	120.51	4.17				14.10		82.82		19.42			
86.15	1084.82	36.96	2.51				5.01		23.18		6.26			
88.26	1111.35	26.53					3.68		16.53		4.73			1.59
91.75	1155.37	44.02					6.29		26.27		6.86			4.60
95.33	1200.38	45.00					6.43		25.73		7.04			5.81
100.00	1259.22	58.84												

Anexo 47. Detalle de la Combinación con 10% de Vidrio.



Tamiz	Tamiz mm	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL		Granulometría Combinada	Media	Especificaciones		Error
		ARIDO A		ARIDO B		ARIDO C		ARIDO D		ARIDO E		Arido F				Lim. Inferior	Lim. Superior	
		% Pasa	2.00	% Pasa	41.00	% Pasa	6.00	% Pasa	35.00	% Pasa	15.00	% Pasa	1.00					
1"	25	100.00	2.00	100.00	41.00	100.00	6.00	100.00	35.00	100.00	15.00	100.00	1	100.00	100	100	100	0.00
3/4"	19	100.00	2.00	99.74	40.89	100.00	6.00	100.00	35.00	100.00	15.00	100.00	1	99.89	95	90	100	-4.89
1/2"	12.5	99.96	2.00	52.00	21.32	100.00	6.00	100.00	35.00	100.00	15.00	100.00	1	80.32	76	67	85	-4.32
3/8"	9.5	99.84	2.00	28.85	11.83	100.00	6.00	100.00	35.00	100.00	15.00	100.00	1	70.83	68	56	80	-2.83
#4	4.75	11.50	0.23	0.00	0.00	96.59	5.80	85.46	29.91	95.11	14.27	100.00	1	51.20	50	35	65	-1.20
#8	2.38	1.78	0.04	0.00	0.00	65.44	3.93	66.89	23.41	54.46	8.17	100.00	1	36.54	36	23	49	-0.54
#10	2	1.19	0.02	0.00	0.00	58.01	3.48	62.17	21.76	48.09	7.21	100.00	1	33.48	32.5	20	45	-0.98
#16	1.19	0.58	0.01	0.00	0.00	40.00	2.40	51.00	17.85	32.62	4.89	100.00	1	26.15	26	15	37	-0.15
#30	0.59	0.16	0.00	0.00	0.00	35.00	2.10	30.00	10.50	18.78	2.82	100.00	1	16.42	17	8	26	0.58
#40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	1.50	25.00	8.75	16.00	2.40	100.00	1	13.65	14	6	22	0.35
#50	0.297	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	1.26	22.00	7.70	13.00	1.95	62.28	0.62	11.53	12	5	19	0.47
#100	0.149	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	0.96	16.00	5.60	8.00	1.20	24.70	0.25	8.01	8.5	3	14	0.49
#200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	0.42	10.00	3.50	3.00	0.45	11.30	0.11	4.48	5	2	8	0.52
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00

Anexo 48. Combinación Teórica con 15% de Vidrio.

% Retenido	P.RetenidoAcum	Peso Retenido [g]	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL	
			ARIDO A	2.00%	ARIDO B	41.00%	ARIDO C	6.00%	ARIDO D	35.00%	ARIDO E	15.00%	ARIDO F	1.00%
0.00	0.00	0.00												
0.11	1.34	1.34			1.34									
19.68	247.33	245.99	8.44		237.55									
29.17	366.64	119.31	3.55		115.76									
48.80	613.25	246.60	2.98		137.50		13.94		54.90		37.28			
63.46	797.48	184.23	4.35				18.06		115.80		46.02			
66.52	836.01	38.52	1.33				3.92		23.03		10.25			
73.85	928.04	92.03	1.13				9.32		58.78		22.80			
83.58	1050.36	122.32	1.12				11.05		80.60		29.55			
86.35	1085.18	34.82	1.11				3.60		21.10		9.01			
88.47	1111.79	26.61					2.80		16.37		7.02			0.42
91.99	1156.09	44.31					4.66		22.85		9.05			7.75
95.52	1200.38	44.29					4.66		26.69		9.10			3.83
100.00	1256.72	56.34												

Anexo 49. Detalle de la Combinación con 15% de Vidrio.

Tamiz	Tamiz mm	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL		Granulometría Combinada	Media	Especificaciones		Error
		ARIDO A		ARIDO B		ARIDO C		ARIDO D		ARIDO E		Arido F				Lim. Inferior	Lim. Superior	
		% Pasa	1.00	% Pasa	41.00	% Pasa	5.00	% Pasa	32.00	% Pasa	20.00	% Pasa	1.00					
1"	25	100.00	1.00	100.00	41.00	100.00	5.00	100.00	32.00	100.00	20.00	100.00	1	100.00	100	100	100	0.00
3/4"	19	100.00	1.00	99.74	40.89	100.00	5.00	100.00	32.00	100.00	20.00	100.00	1	99.89	95	90	100	-4.89
1/2"	12.5	99.96	1.00	52.00	21.32	100.00	5.00	100.00	32.00	100.00	20.00	100.00	1	80.32	76	67	85	-4.32
3/8"	9.5	99.84	1.00	28.85	11.83	100.00	5.00	100.00	32.00	100.00	20.00	100.00	1	70.83	68	56	80	-2.83
#4	4.75	11.50	0.12	0.00	0.00	96.59	4.83	85.46	27.35	95.11	19.02	100.00	1	52.31	50	35	65	-2.31
#8	2.38	1.78	0.02	0.00	0.00	65.44	3.27	66.89	21.40	54.46	10.89	100.00	1	36.59	36	23	49	-0.59
#10	2	1.19	0.01	0.00	0.00	58.01	2.90	62.17	19.89	48.09	9.62	100.00	1	33.42	32.5	20	45	-0.92
#16	1.19	0.58	0.01	0.00	0.00	40.00	2.00	51.00	16.32	32.62	6.52	100.00	1	25.85	26	15	37	0.15
#30	0.59	0.16	0.00	0.00	0.00	35.00	1.75	30.00	9.60	18.78	3.76	100.00	1	16.11	17	8	26	0.89
#40	0.42	0.00	0.00	0.00	0.00	25.00	1.25	25.00	8.00	16.00	3.20	100.00	1	13.45	14	6	22	0.55
#50	0.297	0.00	0.00	0.00	0.00	21.00	1.05	22.00	7.04	13.00	2.60	62.28	0.62	11.31	12	5	19	0.69
#100	0.149	0.00	0.00	0.00	0.00	16.00	0.80	16.00	5.12	8.00	1.60	24.70	0.25	7.77	8.5	3	14	0.73
#200	0.074	0.00	0.00	0.00	0.00	7.00	0.35	10.00	3.20	3.00	0.60	11.30	0.11	4.26	5	2	8	0.74
Fondo		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00

Anexo 50. Combinación Teórica con 20% de Vidrio.



% Retenido	P.RetenidoAcum	Peso Retenido [g]	3/8		5/8		3/16		ARENA		VIDRIO		CAL	
			ARIDO A	1.00%	ARIDO B	41.00%	ARIDO C	5.00%	ARIDO D	32.00%	ARIDO E	20.00%	ARIDO F	1.00%
0.00	0.00	0.00												
0.11	1.34	1.34		1.34										
19.68	246.76	245.42	3.84	241.58										
29.17	365.78	119.02	1.83	117.19										
47.69	597.91	232.13	1.34	132.04	10.73			41.82		46.20				
63.41	795.09	197.18	1.73		16.00			117.93		61.52				
66.58	834.74	39.65	0.68		3.42			20.88		14.67				
74.15	929.73	94.98	1.02		8.19			53.02		32.75				
83.89	1051.86	122.13	0.98		9.53			69.51		42.11				
86.55	1085.19	33.33	0.57		2.87			18.39		11.49				
88.69	1111.99	26.80			2.31			14.79		9.25			0.45	
92.23	1156.45	44.46			3.25			23.53		11.33			6.35	
95.74	1200.38	43.93			3.72			24.25		10.76			5.20	
100.00	1253.83	53.45												

Anexo 51. Detalle de la Combinación con 20% de Vidrio.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO:	Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado	
UBICACIÓN:	Laboratorio de Suelos	GRUPO: Cristina Crespo
SOLICITADO POR:	Ing. Jaime Bojorque	Yessenia Pinos
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:	Muestras Patrón	
FECHA:	12/Octubre/2020	

**DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS - VOLUMEN DE BRIQUETAS**

Nro.	% Betún	E/D	Lecturas						Dimensiones	Volumen
			1	2	3	4	5	6	Promedio	
1	5.0%	Espesor	63.0	64.5	63.3	63.0	64.3	64.2	63.72	515.56
		Diámetro	101.6	101.4	101.6	101.6	101.4	101.4	101.50	
2	5.0%	Espesor	63.0	64.0	63.0	64.0	63.0	63.0	63.33	514.47
		Diámetro	101.4	101.8	101.4	102.5	101.6	101.5	101.70	
3	5.0%	Espesor	63.7	63.0	63.4	63.1	63.0	64.0	63.37	514.58
		Diámetro	101.5	101.6	101.8	101.7	101.7	101.8	101.68	
4	5.5%	Espesor	63.7	63.0	64.3	62.3	63.0	63.0	63.22	511.68
		Diámetro	101.8	101.5	101.3	101.5	101.5	101.5	101.52	
5	5.5%	Espesor	64.7	63.3	63.0	63.0	63.2	62.4	63.27	511.07
		Diámetro	101.5	101.3	101.3	101.8	101.3	101.3	101.42	
6	5.5%	Espesor	63.4	64.5	62.6	62.2	63.8	65.1	63.60	515.46
		Diámetro	101.8	101.4	101.2	101.7	101.5	101.9	101.58	
7	6.0%	Espesor	63.6	64.3	63.6	64.4	62.0	62.4	63.38	515.56
		Diámetro	101.6	101.4	101.8	101.8	102.4	101.6	101.77	
8	6.0%	Espesor	62.4	63.3	63.1	63.0	63.6	64.1	63.25	512.45
		Diámetro	101.8	101.4	101.9	101.4	101.3	101.6	101.57	
9	6.0%	Espesor	63.5	63.3	63.0	63.4	64.2	63.5	63.48	518.40
		Diámetro	102.4	101.5	102.4	101.5	101.7	102.3	101.97	
10	6.5%	Espesor	63.3	63.5	63.0	63.4	63.5	64.3	63.50	515.49
		Diámetro	101.0	101.3	101.6	101.6	102.0	102.5	101.67	
11	6.5%	Espesor	63.0	63.4	64.2	63.5	63.2	63.7	63.50	517.01
		Diámetro	101.0	102.5	101.7	101.6	101.5	102.6	101.82	
12	6.5%	Espesor	63.9	63.3	63.6	63.4	63.6	63.3	63.52	512.59
		Diámetro	101.4	101.4	101.5	101.0	101.4	101.5	101.37	
13	7.0%	Espesor	63.0	63.5	62.3	63.4	63.5	63.5	63.20	511.71
		Diámetro	101.7	101.8	101.0	101.7	101.4	101.6	101.53	
14	7.0%	Espesor	63.4	63.4	63.5	63.2	63.0	62.5	63.17	511.94
		Diámetro	101.4	101.4	101.6	101.7	101.0	102.4	101.58	
15	7.0%	Espesor	63.8	63.0	63.2	63.6	63.9	63.7	63.53	515.42
		Diámetro	101.4	101.4	101.4	101.0	102.2	102.4	101.63	



Anexo 52. Dimensiones de las Briquetas - Muestra Patrón.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Muestras modificadas con 5% vidrio  
 FECHA: 19/Octubre/2020

**DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS - VOLUMEN DE BRIQUETAS**

Nro.	% Betún	E/D	Lecturas						Dimensiones	Volumen
			1	2	3	4	5	6	Promedio	
1	5.0%	Espesor	63.20	63.9	63.4	63.5	63.3	63.8	63.52	516.30
		Diámetro	101.7	102.1	101.9	101.3	101.6	101.8	101.73	
2	5.0%	Espesor	63.6	63.1	63.8	63.0	63.3	62.9	63.28	510.70
		Diámetro	101.0	101.0	101.9	101.5	101.3	101.5	101.37	
3	5.0%	Espesor	63.2	63.6	63.3	63.5	63.4	63.2	63.37	512.39
		Diámetro	101.5	101.4	101.3	101.9	101.4	101.3	101.47	
4	5.5%	Espesor	63.4	63.4	64.3	64.4	64.3	63.3	63.85	515.96
		Diámetro	101.2	101.5	101.8	101.6	101.2	101.3	101.43	
5	5.5%	Espesor	63.4	63.6	63.2	63.4	63.9	63.7	63.53	517.11
		Diámetro	102.3	101.4	101.4	101.9	101.2	102.6	101.80	
6	5.5%	Espesor	63.8	63.8	63.6	64.5	63.6	63.6	63.82	518.74
		Diámetro	101.8	101.7	101.8	101.7	101.9	101.5	101.73	
7	6.0%	Espesor	63.8	64.2	63.4	64.7	63.5	63.6	63.87	518.64
		Diámetro	101.9	101.2	101.8	101.9	101.7	101.6	101.68	
8	6.0%	Espesor	63.4	63.7	63.7	63.7	63.7	63.7	63.65	516.20
		Diámetro	101.5	101.6	102.1	101.6	101.4	101.5	101.62	
9	6.0%	Espesor	64.1	63.1	63.8	63.2	64.2	63.4	63.63	516.23
		Diámetro	101.9	101.4	101.6	101.6	101.4	101.9	101.63	
10	6.5%	Espesor	63.5	63.2	63.3	62.6	63.9	63.7	63.37	515.59
		Diámetro	102.1	101.3	101.8	101.8	101.9	101.8	101.78	
11	6.5%	Espesor	63.4	63.6	63.8	63.7	63.6	64.3	63.73	516.20
		Diámetro	101.5	101.5	101.6	101.6	101.5	101.6	101.55	
12	6.5%	Espesor	63.9	63.4	63.9	63.5	63.6	63.2	63.58	516.67
		Diámetro	102.0	101.3	101.9	101.2	102.1	101.8	101.72	
13	7.0%	Espesor	63.7	63.8	63.9	63.4	63.1	63.1	63.50	516.84
		Diámetro	102.1	102.3	101.3	101.6	101.7	101.8	101.80	
14	7.0%	Espesor	63.4	63.6	64.3	63.9	63.9	63.8	63.82	516.70
		Diámetro	102.1	101.2	102.0	101.3	101.3	101.3	101.53	
15	7.0%	Espesor	63.3	63.6	63.3	63.6	64.4	63.7	63.65	520.27
		Diámetro	102.5	101.8	101.8	101.9	102.2	101.9	102.02	

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería



Laboratorio de Suelos  
Prácticas de Laboratorio

Anexo 53. Dimensiones de las Briquetas - 5% Vidrio.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO:	Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado	
UBICACIÓN:	Laboratorio de Suelos	GRUPO: Cristina Crespo
SOLICITADO POR:	Ing. Jaime Bojorque	Yessenia Pinos
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:	Muestras modificadas con 10% Vidrio	
FECHA	26/Octubre/2020	
<b>DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS - VOLUMEN DE BRIQUETAS</b>		

Nro.	% Betún	E/D	Lecturas						Dimensiones	Volumen
			1	2	3	4	5	6	Promedio	
1	5.0%	Espesor	63.7	63.7	63.7	63.3	63.1	63.5	63.50	516.00
		Diámetro	101.4	101.5	101.9	101.9	101.8	101.8	101.72	
2	5.0%	Espesor	63.5	63.4	63.4	63.3	63.7	63.8	63.52	514.27
		Diámetro	101.6	101.7	101.7	101.4	101.4	101.5	101.53	
3	5.0%	Espesor	63.60	64.0	63.8	63.7	63.3	63.2	63.6	516.64
		Diámetro	101.6	101.9	101.4	101.5	101.8	102.0	101.7	
4	5.5%	Espesor	63.4	63.5	63.7	63.7	63.6	63.7	63.6	516.30
		Diámetro	101.8	101.3	101.9	101.7	101.4	101.9	101.67	
5	5.5%	Espesor	63.6	63.7	63.8	63.6	63.6	63.2	63.58	517.01
		Diámetro	101.4	101.6	102.0	102.1	102.1	101.3	101.75	
6	5.5%	Espesor	63.3	63.7	63.6	63.6	63.5	63.6	63.55	514.71
		Diámetro	101.9	101.5	101.3	101.4	101.7	101.5	101.55	
7	6.0%	Espesor	63.6	63.4	64.3	63.7	63.8	63.2	63.67	517.01
		Diámetro	101.7	101.5	101.7	101.7	101.5	102.0	101.68	
8	6.0%	Espesor	63.7	63.6	63.4	63.6	63.6	63.7	63.60	517.66
		Diámetro	101.8	101.8	101.9	101.6	101.7	102.0	101.80	
9	6.0%	Espesor	63.7	63.8	63.9	63.4	63.2	63.5	63.58	517.35
		Diámetro	102.1	101.7	101.7	101.9	101.7	101.6	101.78	
10	6.5%	Espesor	63.6	63.6	63.7	63.7	63.6	63.6	63.63	516.57
		Diámetro	101.9	101.6	101.5	101.7	101.5	101.8	101.67	
11	6.5%	Espesor	63.6	63.5	63.5	63.6	63.8	63.5	63.58	516.67
		Diámetro	101.9	101.8	101.5	101.9	101.5	101.7	101.72	
12	6.5%	Espesor	63.2	63.5	63.7	63.7	63.7	63.8	63.60	513.94
		Diámetro	101.6	101.4	101.4	101.3	101.6	101.3	101.43	
13	7.0%	Espesor	63.5	63.2	63.9	63.5	63.6	63.5	63.53	517.62
		Diámetro	102.3	101.5	102.1	101.8	101.8	101.6	101.85	
14	7.0%	Espesor	63.8	63.8	63.9	63.3	63.6	63.5	63.65	516.37
		Diámetro	101.1	101.5	101.9	101.5	101.8	102.0	101.63	
15	7.0%	Espesor	63.8	63.5	63.6	63.3	63.1	63.8	63.52	514.44
		Diámetro	101.2	101.6	101.7	101.6	101.6	101.6	101.55	



Anexo 54. Dimensiones de las Briquetas - 10% Vidrio.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Muestras modificadas con 15% Vidrio  
 FECHA 06/Noviembre/2020

**DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS - VOLUMEN DE BRIQUETAS**

Nro.	% Betún	E/D	Lecturas						Dimensiones	Volumen
			1	2	3	4	5	6	Promedio	
1	5.0%	Espesor	63.9	63.5	63.4	63.8	63.7	63.5	63.63	516.57
		Diámetro	101.7	102.0	101.8	101.5	101.5	101.5	101.67	
2	5.0%	Espesor	63.6	63.4	63.4	63.1	63.5	63.5	63.42	517.35
		Diámetro	102.1	101.8	101.8	102.1	102.1	101.6	101.92	
3	5.0%	Espesor	63.5	63.3	63.6	63.7	63.4	63.4	63.48	516.71
		Diámetro	101.4	102.0	102.0	101.8	101.7	101.9	101.80	
4	5.5%	Espesor	63.9	63.5	63.3	63.6	63.8	63.6	63.62	517.12
		Diámetro	101.5	102.0	101.4	101.5	102.0	102.0	101.73	
5	5.5%	Espesor	63.5	63.7	63.5	63.6	63.4	63.6	63.55	514.04
		Diámetro	101.5	101.5	101.5	101.5	101.5	101.4	101.48	
6	5.5%	Espesor	64.0	63.6	63.9	63.4	63.0	64.0	63.65	517.22
		Diámetro	101.6	101.6	101.7	101.2	102.0	102.2	101.72	
7	6.0%	Espesor	63.8	63.6	63.7	63.7	63.6	63.7	63.68	515.29
		Diámetro	101.4	101.6	101.3	101.6	101.6	101.5	101.5	
8	6.0%	Espesor	63.8	63.8	63.8	63.8	64.2	63.7	63.85	519.18
		Diámetro	101.8	102.4	101.5	101.6	101.2	102.0	101.75	
9	6.0%	Espesor	64.2	63.4	64.0	63.6	63.6	63.9	63.78	517.11
		Diámetro	101.5	101.6	102.0	101.5	101.6	101.4	101.60	
10	6.5%	Espesor	63.9	63.8	63.6	63.7	63.6	64.1	63.78	520.51
		Diámetro	102.0	101.8	102.1	101.7	101.8	102.2	101.93	
11	6.5%	Espesor	64.1	63.8	63.7	63.6	63.1	63.9	63.7	515.25
		Diámetro	101.5	101.4	101.3	101.7	101.5	101.5	101.48	
12	6.5%	Espesor	63.4	64.0	63.8	63.8	63.9	63.8	63.78	518.98
		Diámetro	101.4	102.0	101.8	102.0	101.7	101.8	101.78	
13	7.0%	Espesor	63.6	63.9	64.6	63.3	63.9	63.7	63.33	517.01
		Diámetro	101.7	101.6	101.4	101.5	101.5	101.6	101.55	
14	7.0%	Espesor	63.8	63.2	63.6	63.9	63.6	63.2	63.55	514.71
		Diámetro	101.7	101.6	101.4	101.5	101.5	101.6	101.55	
15	7.0%	Espesor	63.8	63.6	63.4	63.8	63.6	63.7	63.65	516.71
		Diámetro	101.5	101.5	102.2	101.5	101.8	101.5	101.67	

UNIVERSIDAD DE CUENCA  
Facultad de Ingeniería



Prácticas de Laboratorio

Anexo 55. Dimensiones de las Briquetas - 15% Vidrio.



Fundada en 1867  
**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

PROYECTO: Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
 UBICACIÓN: Laboratorio de Suelos GRUPO: Cristina Crespo  
 SOLICITADO POR: Ing. Jaime Bojarque Yessenia Pinos  
 DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: Muestras modificadas con 20% Vidrio  
 FECHA 11 / Noviembre / 2020

**DIMENSIONES DE LAS BRIQUETAS - VOLUMEN DE BRIQUETAS**

Nro.	% Betún	E/D	Lecturas						Dimensiones	Volumen
			1	2	3	4	5	6	Promedio	
1	5.0%	Espesor	64.2	63.7	63.6	63.9	62.9	63.8	63.68	516.81
		Diámetro	101.6	101.7	101.8	101.6	101.7	101.5	101.65	
2	5.0%	Espesor	63.4	63.4	63.9	63.7	63.6	63.9	63.65	514.17
		Diámetro	101.2	101.5	101.1	101.4	101.8	101.5	101.42	
3	5.0%	Espesor	64.2	63.1	63.5	63.5	63.7	63.9	63.65	514.34
		Diámetro	101.1	101.2	101.7	101.4	101.8	101.4	101.43	
4	5.5%	Espesor	63.9	63.8	64.0	63.6	63.9	63.2	63.73	518.06
		Diámetro	101.4	101.9	102.2	101.9	101.7	101.3	101.73	
5	5.5%	Espesor	62.6	63.9	63.7	63.4	63.4	63.8	63.47	515.73
		Diámetro	101.4	101.5	101.6	102.1	101.8	101.9	101.72	
6	5.5%	Espesor	63.5	64.3	63.6	63.9	63.7	63.7	63.78	518.81
		Diámetro	101.8	101.7	101.6	101.8	102.1	101.6	101.77	
7	6.0%	Espesor	63.3	63.7	64.1	63.9	64.4	63.8	63.87	517.11
		Diámetro	101.9	101.5	101.8	101.2	101.4	101.4	101.53	
8	6.0%	Espesor	63.0	64.1	64.1	63.5	63.7	63.9	63.72	519.29
		Diámetro	101.7	101.8	101.5	102.4	101.7	102.1	101.87	
9	6.0%	Espesor	63.5	63.1	63.7	63.7	63.6	63.5	63.52	517.15
		Diámetro	101.6	102.1	102.1	101.9	101.6	101.6	101.82	
10	6.5%	Espesor	63.5	64.0	64.0	63.3	63.2	64.0	63.67	514.98
		Diámetro	101.1	101.4	101.8	101.8	101.6	101.2	101.48	
11	6.5%	Espesor	63.4	63.9	63.3	63.9	63.2	63.6	63.55	514.21
		Diámetro	101.6	101.5	101.3	101.3	101.9	101.4	101.5	
12	6.5%	Espesor	63.6	63.6	63.9	63.5	63.6	63.6	63.63	517.25
		Diámetro	101.8	102.0	101.2	101.9	101.5	102.0	101.73	
13	7.0%	Espesor	63.4	63.7	63.6	63.7	63.4	63.8	63.60	514.95
		Diámetro	101.2	101.9	101.0	101.8	101.8	101.5	101.53	
14	7.0%	Espesor	63.7	63.3	63.3	62.6	63.0	63.7	63.35	513.43
		Diámetro	101.5	101.6	101.7	101.6	101.7	101.4	101.58	
15	7.0%	Espesor	63.5	63.7	63.6	63.5	63.5	63.4	63.53	518.13
		Diámetro	102.0	102.1	101.3	102.4	101.8	101.8	101.90	



Anexo 56. Dimensiones de las Briquetas - 20% Vidrio.



UNIVERSIDAD DE CUENCA											
PROYECTO:		Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado								GRUPO:	Cristina Crespo
UBICACIÓN:		Laboratorio de Suelos									Yessenia Pinos
SOLICITADO POR:		Ing. Jaime Bojorque									
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:		Muestra Patrón									
FECHA:		13/Octubre/2020									
ENSAYO MARSHALL											
Briqueta	%	Pesos [gr.]			Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad Bulk briq.	Estabilidad			Flujo [mm]	
		Seco en Aire	SSS en aire	Sumergido			lb.	F.C.	lb.		
1.1	5.0%	1211.97	1212.50	687.00	525.50	2.306	4669.43	0.96	4482.65	3.01	
1.2		1211.24	1212.80	687.20	525.60	2.304	4694.27	0.96	4506.50	1.71	
1.3		1212.48	1213.20	687.50	525.70	2.306	4259.61	0.96	4089.23	2.70	
<b>PROM</b>						<b>2.306</b>			<b>4359.46</b>	<b>2.473</b>	
2.1	5.5%	1208.80	1209.00	687.00	522.00	2.316	5588.41	1.00	5588.41	1.93	
2.2		1209.35	1210.90	689.50	521.40	2.319	6010.65	1.00	6010.65	2.75	
2.3		1207.27	1208.60	688.60	520.00	2.322	6879.96	1.00	6879.96	3.61	
<b>PROM</b>						<b>2.319</b>			<b>6159.67</b>	<b>2.763</b>	
3.1	6.0%	1209.93	1210.60	692.40	518.20	2.335	4917.80	1.00	4917.80	3.00	
3.2		1209.51	1210.10	692.40	517.70	2.336	5501.48	1.00	5501.48	3.74	
3.3		1209.74	1210.30	692.30	518.00	2.335	5811.95	1.00	5811.95	3.36	
<b>PROM</b>						<b>2.336</b>			<b>5410.41</b>	<b>3.367</b>	
4.1	6.5%	1209.05	1210.40	691.00	519.40	2.328	6612.66	1.00	6612.66	3.54	
4.2		1209.90	1210.30	691.80	518.50	2.333	6470.14	1.00	6470.14	3.76	
4.3		1209.78	1210.80	691.90	518.70	2.331	5898.88	1.00	5898.88	3.54	
<b>PROM</b>						<b>2.331</b>			<b>6327.23</b>	<b>3.613</b>	
5.1	7.0%	1205.79	1206.40	689.10	517.30	2.331	5515.53	1.00	5515.53	4.25	
5.2		1206.00	1207.50	689.50	518.00	2.328	5679.90	1.00	5679.90	3.10	
5.3		1206.95	1207.00	689.90	517.10	2.334	5751.48	1.00	5751.48	4.58	
<b>PROM</b>						<b>2.331</b>			<b>5648.97</b>	<b>3.977</b>	

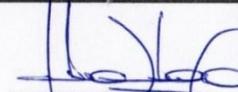
  
 Prácticas de Laboratorio  


Anexo 57. Ensayo Marshall con Mezcla Patrón.

Susana Cristina Crespo Argudo  
Yessenia Marcela Pinos Veletanga



PROYECTO:		Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado											
UBICACIÓN:		Laboratorio de Suelos								GRUPO:		Cristina Crespo Yessenia Pinos	
SOLICITADO POR:		Ing. Jaime Bojorque											
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:		Muestra modificada con 5% Vidrio											
FECHA		20/Octubre/2020											
ENSAYO MARSHALL													
Briqueta	% Asfalto	Pesos [gr.]			Volumen [cm3]	Densidad Bulk briq.	Estabilidad			Flujo			
		Seco en Aire	SSS en aire	Sumergido			lb.	F.C	lb.	[mm]			
1.1	5.0%	1208.04	1209.40	690.20	519.20	2.327	5644.59	1.00	5644.59		3.54		
1.2		1207.92	1210.90	693.30	517.60	2.334	5806.04	1.00	5806.04		3.46		
1.3		1205.35	1207.60	688.00	519.60	2.320	5775.29	1.00	5775.29		3.13		
PROM						<b>2.327</b>			<b>5741.97</b>		<b>3.377</b>		
2.1	5.5%	1208.36	1210.30	690.30	520.00	2.324	5725.02	1.00	5725.02		3.02		
2.2		1209.85	1210.40	689.70	520.70	2.324	4769.37	1.00	4769.37		2.72		
2.3		1210.00	1211.20	694.00	517.20	2.340	5147.85	1.00	5147.85		3.76		
PROM						<b>2.329</b>			<b>5214.08</b>		<b>3.163</b>		
3.1	6.0%	1209.69	1210.30	691.30	519.00	2.331	5706.69	1.00	5706.69		4.05		
3.2		1208.83	1211.20	691.80	519.40	2.327	5445.89	1.00	5445.89		3.51		
3.3		1206.46	1209.60	692.20	517.40	2.332	5483.15	1.00	5483.15		3.13		
PROM						<b>2.330</b>			<b>5545.24</b>		<b>3.564</b>		
4.1	6.5%	1206.87	1209.40	693.80	515.60	2.341	5657.01	1.00	5657.01		3.91		
4.2		1206.26	1208.90	689.30	519.60	2.322	5452.40	1.00	5452.40		2.90		
4.3		1206.46	1209.10	687.70	521.40	2.314	5749.86	1.00	5749.86		6.29		
PROM						<b>2.325</b>			<b>5619.76</b>		<b>4.366</b>		
5.1	7.0%	1207.31	1211.40	691.70	519.70	2.323	5864.88	1.00	5864.88		3.16		
5.2		1208.51	1211.30	690.40	520.90	2.320	5734.78	1.00	5734.78		3.61		
5.3		1208.22	1210.50	692.40	518.10	2.332	5892.97	1.00	5892.97		4.15		
PROM						<b>2.325</b>			<b>5830.87</b>		<b>3.641</b>		

  
Prácticas de Laboratorio

  
Laboratorio de Suelos

Anexo 58. Ensayo Marshall con 5% Vidrio.



**PROYECTO:** Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado  
**UBICACIÓN:** Laboratorio de Suelos **GRUPO:** Cristina Crespo  
**SOLICITADO POR:** Ing. Jaime Bojorque Yessenia Pinos  
**DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:** Muestra modificada con 10% Vidrio  
**FECHA:** 27/Octubre/2020

ENSAYO MARSHALL										
Briqueta	%	Pesos [gr.]			Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad Bulk briq.	Estabilidad			Flujo [mm]
		Seco en Aire	SSS en aire	Sumergido			lb.	F.C.	lb.	
1.1	5.0%	1213.30	1215.02	690.20	524.82	2.312	4263.52	0.96	4092.98	2.883
1.2		1205.10	1207.59	691.40	516.19	2.335	4498.17	1.00	4498.17	2.966
1.3		1213.60	1214.86	691.40	523.46	2.318	4495.57	0.96	4315.75	2.949
<b>PROM</b>						<b>2.322</b>			<b>4302.30</b>	<b>2.933</b>
2.1	5.5%	1212.20	1214.04	692.10	521.94	2.322	5234.78	1.00	5234.78	3.41
2.2		1211.62	1213.00	691.00	522.00	2.321	5258.31	1.00	5258.31	3.064
2.3		1215.80	1216.37	693.40	522.97	2.325	5209.94	1.00	5209.94	2.933
<b>PROM</b>						<b>2.323</b>			<b>5234.34</b>	<b>3.136</b>
3.1	6.0%	1212.70	1214.97	696.10	518.87	2.337	5902.13	1.00	5902.13	3.855
3.2		1217.60	1219.36	691.60	527.76	2.307	5905.39	0.96	5669.17	3.374
3.3		1214.00	1216.29	692.40	523.89	2.317	6032.83	0.96	5791.51	3.789
<b>PROM</b>						<b>2.321</b>			<b>5787.61</b>	<b>3.679</b>
4.1	6.5%	1214.20	1215.60	690.80	524.80	2.314	6241.34	0.96	5991.69	3.987
4.2		1214.80	1216.41	692.90	523.51	2.320	6228.92	0.96	5979.77	3.674
4.3		1208.00	1210.29	692.90	517.39	2.335	6117.15	1.00	6117.15	3.756
<b>PROM</b>						<b>2.323</b>			<b>6029.54</b>	<b>3.806</b>
5.1	7.0%	1209.10	1210.48	691.10	519.38	2.328	4346.55	1.00	4346.55	3.674
5.2		1210.90	1212.57	692.30	520.27	2.327	4594.92	1.00	4594.92	2.916
5.3		1215.70	1219.01	692.60	526.41	2.309	4717.81	0.96	4721.09	2.488
<b>PROM</b>						<b>2.322</b>			<b>4721.09</b>	<b>3.026</b>

  
 Prácticas de Laboratorio  


Anexo 59. Ensayo Marshall con 10% Vidrio.



Fundada en 1867  
UNIVERSIDAD DE CUENCA

PROYECTO: <u>Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado</u> UBICACIÓN: <u>Laboratorio de Suelos</u> GRUPO: <u>Cristino Crespo</u> SOLICITADO POR: <u>Ing. Jaime Bojorque</u> <u>Yessenia Pinos</u> DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL: <u>Muestra modificada con 15% Vidrio</u> FECHA: <u>07/Noviembre/2020</u>											
ENSAYO MARSHALL											
Briqueta	% Asfalto	Pesos [gr.]			Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad Bulk brig.	Estabilidad			Flujo	
		Seco en Aire	SSS en aire	Sumergido			lb.	F.C	lb.	[mm]	
1.1	5.0%	1214.31	1217.80	694.10	523.70	2.319	5455.06	0.96	5236.86		3.295
1.2		1215.64	1218.10	694.40	523.70	2.321	5560.33	0.96	5337.91		3.822
1.3		1214.29	1216.30	695.20	521.10	2.330	5451.81	1.00	5451.81		2.933
PROM						<b>2.323</b>			<b>5342.19</b>		<b>3.350</b>
2.1	5.5%	1211.01	1213.00	693.60	519.40	2.332	6361.63	1.00	6361.63		3.921
2.2		1213.88	1215.40	694.90	520.50	2.332	6358.37	1.00	6358.37		3.707
2.3		1211.78	1213.20	693.00	520.20	2.329	6768.19	1.00	6768.19		3.295
PROM						<b>2.331</b>			<b>6496.06</b>		<b>3.641</b>
3.1	6%	1215.93	1217.30	692.40	524.90	2.316	6656.42	0.96	6390.17		3.822
3.2		1214.60	1216.50	696.40	520.10	2.335	6383.21	1.00	6383.21		3.756
3.3		1210.09	1210.90	691.30	519.60	2.329	6507.40	1.00	6507.40		3.509
PROM						<b>2.327</b>			<b>6426.93</b>		<b>3.696</b>
4.1	6.5%	1211.48	1211.60	693.30	518.30	2.337	6246.61	1.00	6246.61		3.311
4.2		1212.60	1213.00	693.20	519.80	2.333	6097.58	1.00	6097.58		3.921
4.3		1213.54	1213.70	691.20	522.50	2.323	6544.65	1.00	6544.65		3.295
PROM						<b>2.331</b>			<b>6296.28</b>		<b>3.509</b>
5.1	7.0%	1210.36	1212.20	693.90	518.30	2.335	6842.70	1.00	6842.70		3.526
5.2		1212.38	1213.20	691.30	521.90	2.323	5861.63	1.00	5861.63		3.46
5.3		1213.14	1214.90	690.60	524.30	2.314	6333.54	0.96	6080.20		3.938
PROM						<b>2.324</b>			<b>6261.51</b>		<b>3.641</b>

Prácticas de Laboratorio

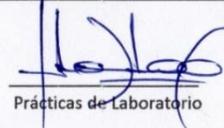
Laboratorio de Suelos

Anexo 60. Ensayo Marshall con 15% Vidrio.



Fundada en 1867  
UNIVERSIDAD DE CUENCA

PROYECTO:		Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado											
UBICACIÓN:		Laboratorio de Suelos								GRUPO:		Cristina Crespo Yessenia Pinos	
SOLICITADO POR:		Ing. Jaime Bojorque											
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:		Muestra modificada con 20% Vidrio											
FECHA		16/Noviembre/2020											
ENSAYO MARSHALL													
Briquetta	% Asfalto	Pesos [gr.]			Volumen [cm <sup>3</sup> ]	Densidad Bulk briq.	Estabilidad			Flujo			
		Seco en Aire	SSS en aire	Sumergido			lb.	F.C.	lb.	[mm]			
1.1	5.0%	1211.47	1213.30	692.30	521.00	2.325	6085.16	1.00	6085.16		2.933		
1.2		1213.47	1216.40	693.30	523.10	2.320	6743.35	0.96	6473.62		3.493		
1.3		1215.70	1216.30	694.00	522.30	2.328	6532.24	1.00	6532.24		2.521		
PROM						2.324			6363.67		2.982		
2.1	5.5%	1211.86	1212.40	692.70	519.70	2.332	6842.70	1.00	6842.70		2.834		
2.2		1213.19	1214.80	691.70	523.10	2.319	7389.13	0.96	7093.56		3.279		
2.3		1214.70	1215.50	694.30	521.20	2.331	6892.38	1.00	6892.38		2.867		
PROM						2.327			6942.88		2.993		
3.1	6.0%	1211.02	1211.60	694.60	517.00	2.342	7314.61	1.00	7314.61		3.114		
3.2		1211.19	1213.40	694.50	518.90	2.334	6942.05	1.00	6942.05		2.62		
3.3		1212.48	1213.10	694.90	518.20	2.340	6656.42	1.00	6656.42		3.229		
PROM						2.339			6971.03		2.988		
4.1	6.5%	1211.51	1212.00	693.80	518.20	2.338	6519.82	1.00	6519.82		3.196		
4.2		1213.52	1213.80	694.50	519.30	2.337	6631.59	1.00	6631.59		3.311		
4.3		1214.91	1215.30	690.30	525.00	2.314	7053.82	0.96	6771.67		3.048		
PROM						2.330			6641.02		3.185		
5.1	7.0%	1211.80	1212.10	692.30	519.80	2.331	6115.92	1.00	6115.92		3.262		
5.2		1213.70	1213.70	691.70	522.00	2.325	6277.36	1.00	6277.36		3.328		
5.3		1211.27	1212.60	693.80	518.80	2.335	6805.45	1.00	6805.45		2.998		
PROM						2.330			6399.57		3.196		

  
Prácticas de Laboratorio

  
Laboratorio de Suelos

Anexo 61. Ensayo Marshall con 20% Vidrio.



PROYECTO:	Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado	
UBICACIÓN:	Laboratorio de Suelos	GRUPO: Cristina Crespo
SOLICITADO POR:	Ing. Jaime Bojarque	Yessenia Pinos
DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:	Mezclas Asfálticas Sueltas	
FECHA	20/Noviembre/2020	
<b>GRAVEDAD ESPECIFICA DE LA MEZCLA BITUMINOSA - ENSAYO RICE</b>		

Porcentaje de Asfalto	6.0%		6.0%		6.0%		6.0%		6.0%	
Porcentaje de vidrio	0% Vidrio		5% Vidrio		10% Vidrio		15% Vidrio		20% Vidrio	
A. Peso del Material [gr.]	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0	1500.0
B. Peso Picnómetro + Agua [gr.]	7253.5	7251.8	7253.0	7251.3	7251.7	7251.3	7251.7	7251.7	7251.7	7253.2
C. Peso Picnómetro + Agua + Material [gr]	8131.0	8153.0	8133.0	8138.0	8134.0	8129.0	8130.0	8129.0	8131.0	8129.0
Peso Específico Máximo Muestra (Gmm)	2.410	2.505	2.419	2.446	2.428	2.410	2.413	2.409	2.417	2.403
Promedio Gmm $Gmm = \frac{A}{A+B-C}$	2.457		2.433		2.419		2.411		2.410	



Anexo 62. Ensayo Rice.



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Evaluación de Mezclas Asfálticas Modificadas con Vidrio Triturado		
<b>UBICACIÓN:</b>	Laboratorio de suelos	<b>GRUPO:</b>	Cristina Crespo
<b>SOLICITADO POR:</b>	Ing. Jaime Bojorque		Yessenia Pinos
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Briquetas		
<b>FECHA</b>	17/12/2020		

**DEGRADACIÓN DE LAS BRIQUETAS MEDIANTE EL USO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES**

% ASFALTO	% Vidrio	Nro. Muestra	Peso antes del Ensayo	Peso después del Ensayo	% Degradación	Promedio
6.50%	0%	1	1278.23	1246.95	2.45	1.76
		2	1270.12	1256.53	1.07	
6.33%	5%	1	1279.72	1266.19	1.06	0.98
		2	1268.93	1257.6	0.89	
6.13%	10%	1	1257.06	1250.42	0.53	0.41
		2	1272.07	1268.31	0.30	
5.93%	15%	1	1269.42	1265.64	0.30	0.32
		2	1267.92	1263.65	0.34	
5.90%	20%	1	1269.83	1266.57	0.26	0.20
		2	1256.46	1254.78	0.13	

**P1** Peso Antes del Ensayo

**P2** Peso Después del Ensayo

**D** Degradación  $D = \frac{P1 - P2}{P1} * 100\%$

Anexo 63. Resultados del Ensayo de Cántabro.



Anexo 64. Briquetas Patrón.



Anexo 65. Briquetas con 5% de vidrio.



Anexo 66. Briquetas con 15% de vidrio.



Anexo 67. Briquetas con 20% de vidrio.