



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROYECTO DE GRADUACIÓN I

“PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR PARA EL RECICLAJE DE CONCRETO ASFÁLTICO”

PRESENTADO POR:

11651039 ALEJANDRO JOSÉ BERTETTY LÓPEZ

11851041 LUIS FERNANDO CASTILLO ZÚNIGA

ASESORA METODOLÓGICA: M. SC. ING. KARLA ANTONIA UCLÉS BREVÉ

ASESOR TEMÁTICO: M. SC. ING. JUAN CARLOS REYES ZÚNIGA

CAMPUS TEGUCIGALPA; JULIO, 2023.

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada principalmente a nuestros padres, quienes con su apoyo incondicional fueron pilares desde el comienzo de nuestra carrera universitaria y gracias a ellos ha sido posible realizar el presente trabajo.

A nuestros familiares por su presencia y oraciones en momentos donde necesitábamos su apoyo moral para seguir adelante con nuestros estudios.

Por último, queremos dedicar este proyecto a todas nuestras amistades que estuvieron presentes a lo largo del desarrollo de este proyecto y carrera universitaria brindándonos sus consejos y ayuda.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Santos Industria por su colaboración por parte de la empresa privada con las donaciones realizadas para poder llevar a cabo la presente investigación.

Agradecemos a la Arq. María José Zúniga Padilla por su colaboración para que las donaciones de cemento y residuos de concreto asfálticos a tiempo para realizar las pruebas de laboratorio.

EPÍGRAFE

El éxito no es un accidente, es trabajo duro, perseverancia, aprendizaje, estudio, sacrificio y, sobre todo, amar lo que estás haciendo.

-Edson Arantes do Nascimento

RESUMEN EJECUTIVO

El pavimento de concreto asfáltico, que conforma el 33.37% de las carreteras principales y secundarias de Honduras, comparado al 5.8% del concreto hidráulico, al igual que cualquier obra estructural, tiene una vida útil de diseño. Adicionalmente, las estructuras de pavimento de concreto asfáltico sufren deterioro por diferentes causas como sobrecarga vehicular, tipo de terreno, tipo de suelo, condiciones climáticas extremas, sometimiento a altas temperaturas por exposición al fuego, entre otras.

Como consecuencia de lo anterior, se ha identificado la existencia de una problemática causada por las obras de repavimentación de concreto asfáltico, ya que en estas obras se requiere la demolición de la carpeta asfáltica, lo que genera un residuo de este material, el cual es generalmente depositado en botaderos, por lo que se ha definido una propuesta de diseño para reutilizar residuos de concreto asfáltico (RAP por sus siglas en inglés) en mezclas con concreto asfáltico reciclado.

Para la propuesta ha sido necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio consistentes en la construcción de especímenes de concreto asfáltico reciclado, con base en el procedimiento utilizado por el Departamento de Transporte de Estados Unidos de América de la Administración Federal de Carreteras, el cual se rige por normativas ASTM.

Como requisito previo a la construcción de los especímenes de concreto asfáltico reciclado se han realizado ensayos de granulometría, peso específico de los agregados y al RAP. Adicionalmente, se han realizado ensayos de penetración, ductilidad y punto de ignición al cemento asfáltico virgen para conocer las propiedades de este material.

Como conclusión se ha observado que al utilizar RAP en las mezclas se tiene una disminución de 7% a 17% de estabilidad, por lo que según los criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A.) para el Diseño de Marshall, tanto la estabilidad como la deformación obtenidas del ensayo Marshall, la mezcla asfáltica con residuo de concreto asfáltico puede ser utilizada en carpetas de rodadura.

Palabras clave: demolición de carpeta asfáltica, manejo de residuos asfálticos, mezcla asfáltica reciclada, pavimentos, residuo de concreto asfáltico.

ABSTRACT

Asphalt concrete pavement, which conforms 33.37% of the main and secondary highways in Honduras compared to the 5.8% of rigid pavement, like any structural work, has a life span design. Additionally, asphalt concrete pavement structures suffer deterioration due to different causes such as vehicle overload, type of terrain, type of soil, extreme conditions, subjection to high temperatures due to fire exposure, among others.

Because of the above, the existence of a problem caused by the asphalt concrete resurfacing works has been identified, since in these works the demolition of the asphalt course is required, which generates a residue of this material, which is generally deposited in dumps, for which a design proposal has been defined to reuse asphalt concrete residues in mixtures with reclaimed asphalt pavement (RAP).

For the proposal, it has been necessary to carry out laboratory tests consisting of the construction of recycled asphalt concrete specimens, based on the procedure used by the United States Department of Transportation of the Federal Highway Administration, which follows ASTM standards.

As a prerequisite for the construction of the recycled asphalt concrete specimens, granulometry, specific weight of the aggregates and RAP tests have been carried out. Additionally, penetration, ductility and ignition point tests have been carried out on virgin asphalt cement, to determine the properties of this material.

As a conclusion, it has been observed that when using RAP in the mixtures there is a percentage decrease of 7% and 17% in stability, therefore, according to the criteria of the Asphalt Institute (U.S.A) for the Marshall Design, both the stability and the deformation obtained from the Marshall test, the asphalt mixture with RAP can be used in road surfaces:

Key words: asphalt concrete residue, asphalt course demolition, asphalt waste management, pavements, recycled asphalt mix.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I	Introducción.....	1
II	Planteamiento del Problema	3
2.1	Precedentes del Problema	3
2.2	Definición del Problema.....	4
2.3	Justificación.....	5
2.4	Preguntas de Investigación.....	6
2.5	Objetivos.....	6
2.5.1	Objetivo General.....	6
2.5.2	Objetivos específicos.....	7
III	Marco Teórico.....	8
3.1	Pavimentos.....	8
3.1.1	Tipos de pavimento.....	8
3.1.2	Procedimiento de diseño de pavimento flexible.....	17
3.1.3	Agregados utilizados en pavimentación	22
3.2	Asfalto.....	26
3.2.1	Aplicaciones del asfalto en la construcción.....	27
3.2.2	Tipos de asfaltos utilizados en pavimentos.....	30
3.2.3	Demanda de asfalto.....	33
3.3	Concreto asfáltico.....	34
3.3.1	Método Marshall para diseño de mezcla de concreto asfáltico.....	34
3.3.2	Elaboración en planta del concreto asfáltico	54

3.3.3	Conservación del pavimento de concreto asfáltico	58
3.4	Diseño de mezcla de concreto asfáltico reciclado.....	61
3.4.1	Leyes y normativas de gestión de residuos de construcción en Honduras	61
3.4.2	Normativas utilizadas en Estados Unidos de América para el reciclaje del residuo de concreto asfáltico.....	63
3.4.3	Implementación en construcción del residuo de concreto asfáltico reciclado.....	66
3.4.4	Normativas para la calificación del residuo de concreto asfáltico.....	68
3.4.5	Diseño de mezcla de concreto asfáltico reciclado por medio de la normativa seleccionada.....	75
3.5	Ventajas y desventajas del concreto asfáltico reciclado	81
IV	Metodología	83
4.1	Enfoque	83
4.2	Variables de Investigación.....	83
4.2.1	Variables de investigación de la mezcla virgen.....	83
4.2.1	Variables de la investigación de la mezcla reciclada.....	84
4.2.2	Calificación del asfalto.....	84
4.3	Técnicas e Instrumentos Aplicados	85
4.4	Materiales.....	102
4.4.1	Asfalto PG 76-22.....	102
4.4.2	Residuo de concreto asfáltico.....	102
4.4.3	Grava ¾"	103
4.4.4	Arena	104
4.5	Metodología de Estudio.....	105
4.5.1	Investigación de fuentes secundarias y terciarias.....	105

4.5.2	Investigación de fuentes primarias.....	105
4.5.3	Recolección de residuos de concreto asfáltico	106
4.5.4	Adquisición de agregados nuevos para la mezcla.....	107
4.5.5	Ensayos de laboratorio a los agregados de la mezcla.....	107
4.5.6	Prueba Marshall con agregado virgen	128
4.5.7	Ensayos de laboratorio al residuo de concreto asfáltico.....	146
4.5.8	Diseño de mezcla de concreto asfáltico reciclado.....	149
V	Resultados y Análisis.....	160
5.1	Calificación de los agregados vírgenes.....	160
5.1.1	Calificación del cemento asfáltico.....	160
5.1.2	Calificación del agregado fino.....	163
5.1.3	Calificación del agregado grueso.....	164
5.2	Propiedades de probetas de concreto asfáltico virgen con porcentaje óptimo	165
5.3	Calificación del concreto asfáltico reciclado.....	166
5.3.1	Contenido de asfalto en RAP1.....	166
5.3.2	Contenido de asfalto en RAP2.....	167
5.3.3	Granulometría del agregado RAP1.....	167
5.3.4	Granulometría del agregado RAP2.....	167
5.3.5	Gravedad específica de RAP1	168
5.3.6	Gravedad específica de RAP2	168
5.4	Propiedades de las mezclas con % óptimo de asfalto y RAP	168
5.5	Resultados de propiedades de las tres mezclas diseñadas	169
VI	Conclusiones.....	173

VII	Recomendaciones.....	175
-----	----------------------	-----

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1.	Demolición de carpeta de concreto asfáltico.....	1
Ilustración 2.	Red vial nacional, por tipo de calzada, según red (km).....	3
Ilustración 3.	Mecanismos de disposición final de residuos sólidos en el país.....	4
Ilustración 4.	Capas de pavimento de concreto hidráulico.....	9
Ilustración 5.	Componentes de pavimento rígido.....	10
Ilustración 6.	Distribución de cargas en pavimento rígido.....	11
Ilustración 7.	Capas de pavimento flexible.....	12
Ilustración 8.	Distribución de cargas en pavimento flexible.....	12
Ilustración 9.	Ejemplo de Bache.....	13
Ilustración 10.	Desprendimiento de agregados.....	14
Ilustración 11.	Pulido de superficie.....	14
Ilustración 12.	Desintegración.....	15
Ilustración 13.	Roderos o canalizaciones.....	15
Ilustración 14.	Agrietamiento piel cocodrilo.....	16
Ilustración 15.	Llorado de asfalto.....	16
Ilustración 16.	Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la capa asfáltica.....	19
Ilustración 17.	Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la base.....	19
Ilustración 18.	Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la subbase.....	20
Ilustración 19.	Agregado grueso.....	23
Ilustración 20.	Agregado fino.....	25

Ilustración 21. Filler o polvo mineral.....	26
Ilustración 22. Mina de asfalto natural en Pesca-Boyacá.....	26
Ilustración 23. Propiedades físicas del asfalto.....	27
Ilustración 24. Usos del asfalto en pavimentaciones.....	28
Ilustración 25. Impermeabilización de suelo con asfalto	29
Ilustración 26. Revestimiento con asfalto de canal abierto.....	30
Ilustración 27. Cemento asfáltico.....	30
Ilustración 28. Concreto asfáltico recién colocado.....	34
Ilustración 29. Espécimen de prueba en máquina estabilizadora Marshall	35
Ilustración 30. Ejemplo de gráfica de límite superior e inferior de porcentaje de pase.....	41
Ilustración 31. Ejemplo de gráfico de %pase ideal de los agregados.....	43
Ilustración 32. Molde de probetas de concreto asfáltico.....	47
Ilustración 33. Altura y diámetro por medir de las probetas realizadas	52
Ilustración 34. Vista en elevación de una planta de dosificación y sus partes.	56
Ilustración 35. Vista en planta de una planta de dosificación y sus partes.....	56
Ilustración 36. Planta mezcladora de tambor.....	57
Ilustración 37. Vista en planta de una planta mezcladora de tambor y sus partes.	58
Ilustración 38. Máquina centrífuga para extracción de asfalto.....	73
Ilustración 39. Anillos de filtro para máquina centrífuga.....	73
Ilustración 40. Papel de filtro con contenido bajo de ceniza.....	75
Ilustración 41. Muestra de RAP.....	76
Ilustración 42. Procedimiento de diseño de concreto asfáltico reciclado	77
Ilustración 43. Cuadro de mezcla de viscosidad del asfalto	80

Ilustración 44. Sitio web de INE.....	85
Ilustración 45. Sitio web de AMDC.....	86
Ilustración 46. Sitio web del Departamento de transporte de EE. UU.	87
Ilustración 47. Sitio web de AASHTO.....	88
Ilustración 48. Sitio web de ASTM.....	88
Ilustración 49. Buscador Google académico.....	89
Ilustración 50. Buscador del TSC.....	89
Ilustración 51. Programa Microsoft Word.....	90
Ilustración 52. Programa Microsoft Excel.....	90
Ilustración 53. Programa Google Maps.....	91
Ilustración 54. Aplicación Google Meet.....	91
Ilustración 55. Dispositivo móvil.....	92
Ilustración 56. Ordenador personal.....	93
Ilustración 57. Tamices utilizados.....	93
Ilustración 58. Tamizadora de agregado utilizada.....	94
Ilustración 59. Balanza utilizada.....	94
Ilustración 60. Horno utilizado.....	95
Ilustración 61. Plancha calentadora utilizada.....	95
Ilustración 62. Bomba de succión utilizada.....	96
Ilustración 63. Extractor de especímenes Marshall utilizado.....	96
Ilustración 64. Compactadora Marshall del laboratorio de Ingeniería Civil.....	97
Ilustración 65. Aparato de Cleveland utilizado.....	97
Ilustración 66. Penetrómetro del laboratorio de Ingeniería Civil.....	98

Ilustración 67. Máquina estabilizadora de Marshall utilizada	98
Ilustración 68. Máquina de prueba de ductilidad utilizada.....	99
Ilustración 69. Moldes de probetas Marshall	99
Ilustración 70. Balanza electrostática utilizada.....	100
Ilustración 71. Tarro de laboratorio	100
Ilustración 72. Olla de cocción	101
Ilustración 73. Martillo de goma	101
Ilustración 74. Asfalto PG76-22.....	102
Ilustración 75. Residuo de concreto asfáltico del anillo periférico	103
Ilustración 76. Grava $\frac{3}{4}$ "	104
Ilustración 77. Arena de río	104
Ilustración 78. Residuo de carpeta asfáltica demolida (RAP1)	106
Ilustración 79. Residuo de carpeta asfáltica demolida (RAP2)	106
Ilustración 80. Tanque de cemento asfáltico en Santos Industria.....	107
Ilustración 81. Muestra de 3000g del agregado grueso	108
Ilustración 82. Muestra de 500g del agregado fino.....	108
Ilustración 83. Tamizadora	109
Ilustración 84. Gráfica curva granulométrica del agregado grueso.....	114
Ilustración 85. Gráfica curva granulométrica del agregado fino.....	114
Ilustración 86. Secado de agregado fino	115
Ilustración 87. Extracción de aire del agregado fino	115
Ilustración 88. Peso de arena seca ensayo de peso específico.....	116
Ilustración 89. Extracción de aire del agregado grueso.	118

Ilustración 90. Ductilómetro.....	121
Ilustración 91. Pasta de tiza esparcidas en briquetas	121
Ilustración 92. Preparación del agua con sal	122
Ilustración 93. Briquetas de asfalto	122
Ilustración 94. Briquetas de asfalto en el ductilómetro	123
Ilustración 95. Penetrómetro	124
Ilustración 96. Cápsula de asfalto en agua.....	124
Ilustración 97. Ejemplo de ensayo de penetración.....	125
Ilustración 98. Equipo de Cleveland.....	126
Ilustración 99. Copa de Cleveland con asfalto	127
Ilustración 100. Equipo de Cleveland completo con termómetro.....	127
Ilustración 101. Definición de los límites de pase para diseño de mezcla	129
Ilustración 102. Límites de % de pase para la mezcla realizada.....	130
Ilustración 103. Curva de %pase ideal de los agregados a utilizar para las mezclas	131
Ilustración 104. Gráfica estabilidad vs %asfalto de la mezcla virgen.....	142
Ilustración 105. Gráfica Pa vs % de asfalto de la mezcla virgen	142
Ilustración 106. Gráfica Gmb vs % de asfalto de la mezcla virgen	143
Ilustración 107. Probetas de concreto asfáltico reciclado RAP1	154
Ilustración 108. Probetas de concreto asfáltico reciclado RAP2	155
Ilustración 109. Gráfica de estabilidad vs % de asfalto de la mezcla con RAP1.....	157
Ilustración 110. Gráfica de porcentaje de vacíos vs % de asfalto de mezcla con RAP1	158
Ilustración 111. Gráfica Gmb vs % de asfalto de mezcla con RAP1	158
Ilustración 112. Porcentaje de Vacíos Llenos de aire de la mezcla compactada.....	171

Ilustración 113. Gráfica de Deformación.....	171
Ilustración 114. Gráfica de Estabilidad	172
Ilustración 115. Gráfica de estabilidad vs % de asfalto para mezcla con RAP1.....	206
Ilustración 116. Gráfico de Pa vs % de asfalto para mezcla con RAP1	206
Ilustración 117. Gráfica Gmb vs % de asfalto para mezcla con RAP1	207
Ilustración 118. Gráfica estabilidad vs % de asfalto para mezcla con RAP2.....	214
Ilustración 119. Gráfica Pa vs % de asfalto de mezcla con RAP2.....	214
Ilustración 120. Gráfica de Gmb vs % de asfalto para mezcla con RAP2.....	215

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla para determinar el coeficiente de drenaje.....	20
Tabla 2. Espesores mínimos sugeridos.....	21
Tabla 3. Requisitos para cemento asfáltico por viscosidad a 60°C (AASHTO M 226).....	31
Tabla 4. Clasificación para cemento asfáltico por penetración (AASHTO M 20).....	32
Tabla 5. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515).....	36
Tabla 6. Granulometría del agregado grueso.....	39
Tabla 7. Granulometría del agregado fino.....	39
Tabla 8. Datos de granulometría para el diseño de mezcla de concreto asfáltico.....	40
Tabla 9. Límite superior e inferior de porcentaje de pase.....	41
Tabla 10. Ejemplo de tabla de porcentajes ideales de los agregados.....	42
Tabla 11. Ejemplo de tabla de los pesos requeridos de cada material para las mezclas.....	44
Tabla 12. Ejemplo de asignación de variable a los % de pesos de los materiales.....	49
Tabla 13. Proporciones de correlación de estabilidad	52
Tabla 14. Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall.....	54

Tabla 15. Selección de ligante según porcentaje de concreto asfáltico reciclado.....	64
Tabla 16. Tamaño de la muestra	72
Tabla 17. Ecuaciones para proporcionar los materiales de una mezcla en caliente reciclada	78
Tabla 18. Masa retenida por tamiz del agregado grueso	109
Tabla 19. Masa retenida por tamiz del agregado fino	110
Tabla 20. Granulometría del agregado grueso.	113
Tabla 21. Granulometría del agregado fino	113
Tabla 22. Datos registrados de ensayo de peso específico de agregado fino.....	116
Tabla 23. Variables asignadas a datos de peso específico de agregado fino.....	117
Tabla 24. Pesos específicos del agregado fino.....	118
Tabla 25. Datos registrados del ensayo de peso específico del agregado grueso	119
Tabla 26. Variables asignadas a los datos de peso específico del agregado grueso.....	119
Tabla 27. Pesos específicos del agregado grueso.....	120
Tabla 28. Distancias de rompimiento de briquetas.....	123
Tabla 29. Lecturas de penetración	125
Tabla 30. Granulometría de los tamices definidos para el diseño de mezcla.....	129
Tabla 31. Límites de pase para el tamaño máximo nominal establecido.....	130
Tabla 32. Porcentajes ideales definidos para las mezclas de concreto asfáltico	131
Tabla 33. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 4% de asfalto.....	132
Tabla 34. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 5% de asfalto.....	132
Tabla 35. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 6% de asfalto.....	133
Tabla 36. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 7% de asfalto.....	133
Tabla 37. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 8% de asfalto.....	133

Tabla 38. Dimensiones de probetas de mezcla virgen.....	135
Tabla 39. Carga y deformación registrada de mezclas vírgenes	135
Tabla 40. Pesos de las probetas de mezcla virgen.....	135
Tabla 41. Datos de peso específico de la mezcla virgen	136
Tabla 42. Selección de factor de corrección para probeta virgen de 4% de asfalto.....	140
Tabla 43. Características mecánicas de las mezclas con agregado virgen	141
Tabla 44. Pesos de materiales requeridos para mezcla virgen con % óptimo	144
Tabla 45. Dimensiones de probetas de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto.....	144
Tabla 46. Pesos de probetas de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto	145
Tabla 47. Carga y deformación de las probetas con % óptimo de asfalto de mezcla virgen	145
Tabla 48. Datos de peso específico de mezcla virgen con % óptimo de asfalto	145
Tabla 49. Propiedades mecánicas de una mezcla virgen con % óptimo de asfalto.....	146
Tabla 50. Datos de gravedad específica de RAP1	147
Tabla 51. Datos de gravedad específica de RAP2.....	147
Tabla 52. Contenido de asfalto en RAP1	148
Tabla 53. Contenido de asfalto en RAP2	148
Tabla 54. Porcentajes de pase del agregado de RAP1	148
Tabla 55. Porcentajes de pase del agregado de RAP2	149
Tabla 56. Porcentajes de pase de RAP1 y de agregado nuevo.....	150
Tabla 57. Porcentaje de pase combinado	150
Tabla 58. Verificación de cumplimiento de límites de porcentaje de pase combinado	151
Tabla 59. Porcentajes de los agregados de RAP1 para cada porcentaje.....	153
Tabla 60. Pesos por material para una mezcla reciclada de 5% de asfalto	153

Tabla 61. Pesos de los nuevos agregados para mezcla reciclada de 5% de asfalto	154
Tabla 62. Pesos de filler para una mezcla reciclada de 5% de asfalto.....	154
Tabla 63. Dimensiones de probetas de mezcla con RAP1	155
Tabla 64. Pesos de probetas con RAP1	155
Tabla 65. Carga y deformación de probetas con RAP1	156
Tabla 66. Datos de peso específico de mezcla con RAP1	156
Tabla 67. Propiedades mecánicas de las probetas con RAP1.....	157
Tabla 68. Propiedades de las mezclas recicladas con porcentaje óptimo	159
Tabla 69. Resultados punto de encendido e inflamación	160
Tabla 70. Resultados de ductilidad	160
Tabla 71. Resultados de penetración	161
Tabla 72. Especificaciones para betunes asfálticos.....	161
Tabla 73. Características del asfalto PG 76-22.....	162
Tabla 74. Resultado granulometría agregado fino	163
Tabla 75. Resultado curva granulométrica del agregado fino.....	163
Tabla 76. Resultados de peso específico del agregado fino	164
Tabla 77. Resultados granulometría agregado grueso	164
Tabla 78. Resultado curva granulométrica agregado grueso	165
Tabla 79. Resultados de peso específico del agregado grueso.....	165
Tabla 80. Resultados de propiedades de una mezcla de concreto asfáltico virgen.....	166
Tabla 81. Contenido promedio de asfalto en muestra RAP1	166
Tabla 82. Contenido promedio de asfalto en muestra RAP2.....	167
Tabla 83. Resultado granulometría de muestra 1	167

Tabla 84. Resultado granulometría de muestra 2	167
Tabla 85. Resultados de propiedades de mezclas de % óptimo de asfalto con RAP	168
Tabla 86. Resultados de propiedades de las mezclas diseñadas.....	169
Tabla 87. Criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A.) para el diseño de Marshall.....	170
Tabla 88. Asesoría temática 1	184
Tabla 89. Asesoría temática 2	185
Tabla 90. Asesoría temática 3	186
Tabla 91. Asesoría temática 4	187
Tabla 92. Asesoría temática 5	188
Tabla 93. Asesoría temática 6	189
Tabla 94. Asesoría temática 7	190
Tabla 95. Asesoría temática 8	191
Tabla 96. Asesoría temática 9	192
Tabla 97. Asesoría temática 10.....	193
Tabla 98. Variables de pesos para mezcla virgen con % óptimo de asfalto.....	195
Tabla 99. Factor de corrección para probetas con % óptimo de asfalto mezcla virgen.....	198
Tabla 100. Gmb de mezcla con RAP1 para los contenidos de asfalto de prueba.....	199
Tabla 101. Gmm de mezcla con RAP1 para los contenidos de asfalto de prueba	200
Tabla 102. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 5% de asfalto	200
Tabla 103. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 5.5% de asfalto.....	201
Tabla 104. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 6% de asfalto	201
Tabla 105. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 6.5% de asfalto.....	202
Tabla 106. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 7% de asfalto	202

Tabla 107. Peso específico Bulk de mezcla asfáltica con RAP1	203
Tabla 108. Peso específico efectivo de la mezcla suelta con RAP1	203
Tabla 109. Asfalto absorbido por el agregado de la mezcla con RAP1	203
Tabla 110. Contenido efectivo de asfalto Pbe de la mezcla con RAP1	204
Tabla 111. Porcentaje de vacíos del agregado mineral VMA de la mezcla con RAP1	204
Tabla 112. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada con RAP1 (Pa)	204
Tabla 113. Resultados de estabilidad para mezcla con RAP1	205
Tabla 114. Resultados de deformación para mezcla con RAP1	205
Tabla 115. Gmb de mezcla con RAP2 para los contenidos de asfalto de prueba.....	208
Tabla 116. Gmm de mezcla con RAP2 para los contenidos de asfalto de prueba	208
Tabla 117. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 5% de asfalto	209
Tabla 118. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 5.5% de asfalto.....	209
Tabla 119. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 6% de asfalto	210
Tabla 120. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 6.5% de asfalto.....	210
Tabla 121. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 7% de asfalto	211
Tabla 122. Peso específico Bulk de mezcla asfáltica con RAP2.....	211
Tabla 123. Peso específico efectivo de la mezcla suelta con RAP2 (Gse).....	211
Tabla 124. Asfalto absorbido por el agregado de la mezcla con RAP2	212
Tabla 125. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla con RAP2 (Pbe)	212
Tabla 126. Porcentaje de vacíos del agregado mineral de la mezcla con RAP2 (VMA).....	212
Tabla 127. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla con RAP2 compactada (Pa)	213
Tabla 128. Estabilidad de probetas con mezcla con RAP2	213
Tabla 129. Deformación de probetas con mezcla con RAP2	213

Tabla 130. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con % óptimo de asfalto.....	216
Tabla 131. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con % óptimo de asfalto.....	221
Tabla 132. Factor de corrección para probetas con % óptimo de asfalto mezcla RAP2.....	224
Tabla 133. Cronograma semanas 1-2.....	253
Tabla 134. Cronograma semanas 3-4.....	254
Tabla 135. Cronograma semanas 4-6.....	255
Tabla 136. Cronograma semanas 7-8.....	256
Tabla 137. Cronograma semanas 9-10.....	257

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1- Número estructural.....	17
Ecuación 2- Obtención del espesor de capa.....	18
Ecuación 3- Espesor carpeta asfáltica.....	21
Ecuación 4- Espesor de la base.....	21
Ecuación 5- Espesor de la subbase.....	21
Ecuación 6- Masa retenida acumulado en el tamiz x.....	38
Ecuación 7- Porcentaje de error.....	38
Ecuación 8- Porcentaje de masa retenida acumulada.....	38
Ecuación 9- Porcentaje de pase.....	38
Ecuación 10. % de pase grueso ideal propuesto.....	42
Ecuación 11. % de pase fino ideal propuesto.....	42
Ecuación 12. % de filler ideal propuesto.....	43
Ecuación 13. Porcentaje por peso del filler.....	44
Ecuación 14. Porcentaje por peso de cada material.....	44

Ecuación 15. Porcentaje por peso de mezcla de cada material.....	44
Ecuación 16. Peso para cada material	44
Ecuación 17. Peso específico Bulk del agregado fino	45
Ecuación 18. Peso específico Bulk saturado con superficie seca del agregado fino	45
Ecuación 19. Peso específico aparente del agregado fino	45
Ecuación 20. Porcentaje de absorción del agregado fino	46
Ecuación 21. Peso de la muestra de agregado grueso saturada en agua.....	46
Ecuación 22. Peso específico Bulk del agregado grueso	46
Ecuación 23. Peso específico Bulk saturado con superficie seca del agregado grueso	46
Ecuación 24. Peso específico aparente del agregado grueso	47
Ecuación 25. Porcentaje de absorción del agregado grueso	47
Ecuación 26. Gravedad específica de las pastillas compactadas.....	49
Ecuación 27. Gravedad específica de mezcla suelta	49
Ecuación 28. Sumatoria por peso de la mezcla de los agregados áridos.....	50
Ecuación 29. Peso específico Bulk del agregado total.....	50
Ecuación 30. Peso específico efectivo de la mezcla suelta.....	50
Ecuación 31. Asfalto absorbido por el agregado.....	50
Ecuación 32. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla.....	51
Ecuación 33. Porcentaje de vacíos de agregado mineral.....	51
Ecuación 34. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada.....	51
Ecuación 35. Corrección de la estabilidad	51
Ecuación 36- Contenido de asfalto en la muestra de residuo de concreto asfáltico.....	75
Ecuación 37. % de nuevo cemento asfáltico en porcentaje por peso de mezcla total	79

Ecuación 38. Porcentaje de nuevo cemento asfáltico en porcentaje por peso del agregado.....	79
Ecuación 39. Relación del nuevo asfalto sobre el contenido óptimo de asfalto	80
Ecuación 40. Peso de la muestra seca del agregado.....	116
Ecuación 41. 25% de filler retenido de tamiz 200.....	132
Ecuación 42. 75% de pase 200 de filler	132
Ecuación 43. Porcentaje óptimo de asfalto.....	143
Ecuación 44. Porcentaje del nuevo cemento asfáltico.....	152
Ecuación 45. Porcentaje de nuevo cemento asfáltico para RAP1.....	152
Ecuación 46. Porcentaje efectivo de RAP en la mezcla total	152
Ecuación 47. Porcentaje efectivo de RAP1 en la mezcla	152
Ecuación 48. Porcentaje efectivo de nuevo agregado en la mezcla total	152
Ecuación 49. Porcentaje efectivo de nuevo agregado para RAP1 y RAP2	153
Ecuación 50. Peso específico bulk Gsb para mezcla con RAP.....	156

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Asesorías temáticas	184
Anexo 2. Cálculos de propiedades de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto	194
Anexo 3. Cálculo de propiedades de mezcla de concreto asfáltico con RAP1.....	199
Anexo 4. Cálculo de propiedades de mezcla de concreto asfáltico con RAP2.....	207
Anexo 5. Cálculos de propiedades de mezcla RAP1 con porcentaje óptimo de asfalto	215
Anexo 6. Cálculos de propiedades de mezcla RAP2 con porcentaje óptimo de asfalto	220
Anexo 7. Ensayo de laboratorio #1 TECNISA a muestra de RAP1.....	226
Anexo 8. Ensayo de laboratorio #2 TECNISA a muestra de RAP1	227
Anexo 9. Ensayo de laboratorio #1 TECNISA a muestra de RAP2	228

Anexo 10. Ensayo de laboratorio #2 TECNISA a muestra de RAP2	229
Anexo 11. Entrevista #1	230
Anexo 12. Entrevista #2	231
Anexo 13. Entrevista #3	232
Anexo 14. Entrevista #4	233
Anexo 15. Procedimiento de diseño de mezcla de concreto asfáltico reciclado propuesto	234
Anexo 16. Cronograma	253

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Association of State Highway and Transportation Officials
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CONAM	Consejo Nacional del Ambiente
EMR	Expert Market Research
FL	Fraguado Lento
FM	Fraguado Medio
FR	Fraguado Rápido
INE	Instituto Nacional de Estadística Honduras
RAP	Reclaimed Asphalt Pavement
RDC	Residuos de Construcción y Demolición
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México

GLOSARIO

Bacheo: "Es una reparación menor y localizada del pavimento bituminoso con el propósito de garantizar la uniformidad de la superficie de rodamiento y reparar los daños que se presentan en algunos puntos de la carretera" (Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA, 2021).

Bituminoso: "Que tiene betún o semejanza con él" (RAE, 2023).

Botadero: "Lugar donde se disponen los residuos sólidos sin ningún tipo de control" (CONAM, 2004)."

Carpeta asfáltica: "Es la parte superior del pavimento flexible que proporciona la superficie de rodamiento, es elaborada con material pétreo seleccionado y un producto asfáltico dependiendo del tipo de camino que se va a construir" (Martínez, 2007).

Concreto asfáltico: "Material compuesto por grava, arena y piedra que se une con el asfalto, se establece en capas y se compacta. Se utiliza comúnmente en proyectos de construcción, tales como superficies de carreteras, aeropuertos y aparcamientos" (Ernst, 2004).

Concreto hidráulico: "Es una combinación de cemento Portland, agregados pétreos, agua y en ocasiones aditivos, para formar una mezcla moldeable que al fraguar forma un elemento rígido y resistente" (Secretaría de comunicaciones y transportes, 2004).

Filler: "Son sustancias finamente divididas las cuales son insolubles en asfalto pero que pueden ser dispersadas en él, como un medio de modificar sus propiedades mecánicas y consistencia" (Canteras El Cerro, 2009).

Fresado: “Es el conjunto de actividades que se realizan con una fresadora para eliminar las deformaciones superficiales en carpetas asfálticas o para retirar capas de rodadura deterioradas” (Secretaría de comunicaciones y transportes, 2010).

Material selecto: “Consiste por lo general en material granular, natural o triturado que cumpla con ciertas características de cohesión y elasticidad colocado sobre el terreno natural para que el vehículo circule con mayor comodidad” (INE, 2018).

Pavimento: “Estructura formada por una capa o más capas de material pétreo tratado, cuya función es la de proporcionar al usuario un tránsito cómodo, seguro y rápido, al costo más bajo posible” (Martínez, 2007).

Peso específico bulk: “Es el peso del agregado que se requiere para llenar un recipiente con un volumen unitario específico” (Gutierrez, López, Velasco, & Villera, 2013).

Petróleo: “Líquido natural oleaginosos e inflamable, constituido por una mezcla de hidrocarburos, se extrae de lechos geológicos continentales o marítimos y del que se obtienen productos utilizables con fines energéticos o industriales, como la gasolina, el queroseno o el gasóleo” (RAE, 2023).

Picnómetro: “Los picnómetros son medidores hechos de vidrio o metal y que tienen un volumen fijo” (OIML, 2011).

Poise: “Unidad de medición de viscosidad, simbolizada por P” (Schlumberger, 2023).

Reciclaje: “Reprocesado de los materiales de los residuos cuando se realice como proceso productivo con objeto de destinar esos materiales a los mismos fines a los que se destinaban originalmente o a otros distintos, exceptuando la recuperación de la energía” (RAE, 2023).

Red principal: “Son las rutas que forman la estructura vital de la red vial de la república o que unen ciudades o zonas geográficas de importancia nacional e interdepartamental, pudiendo estas rutas estar pavimentadas o no” (INE, 2018).

Red secundaria: “Son las rutas que unen ciudades y pueblos a la red de carreteras principales entre sí y que tiene principal importancia intra-departamental o excepcionalmente unen hasta tres departamentos de la república, reciben tráficos de carreteras de menor categoría” (INE, 2018).

Red vecinal: “Rutas que unen pueblos y aldeas a la red de carreteras principal o secundarias, tienen importancia exclusivamente departamental o municipal, estas rutas no son pavimentadas y tienen capa de rodado de grava, material selecto o solo terreno natural” (INE, 2018).

Red vial nacional: “Conjunto de carreteras cuya administración corresponde al ministerio del ramo (obras públicas o comunicaciones, dependiendo del país)” (RAE, 2023).

Residuo sólido inerte: “Son los provenientes de construcciones, demoliciones y los resultantes de desastres naturales, que no poseen características de peligrosidad” (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2010).

I INTRODUCCIÓN

El reglamento para el manejo integral de los residuos categoriza el desperdicio de concreto asfáltico producido por la demolición de carpetas asfálticas de rodadura en las obras de reconstrucción de pavimentos como un residuo sólido inerte. El reglamento establece que este tipo de residuos sean depositados en botaderos designados por la municipalidad donde es construida la obra. Incentiva a las empresas para reciclar estos materiales por medio de deducciones y exoneraciones de pagos de impuestos, sin embargo, no especifica ningún procedimiento de reciclaje para el provecho de este material, lo que causa que las empresas sean libres de ejecutar procedimientos empíricos sin las regulaciones necesarias para un reciclaje eficiente.



Ilustración 1. Demolición de carpeta de concreto asfáltico

Fuente: (El sol de bajo, 2022)

En el presente informe, se dará a conocer el proceso propuesto para la reutilización de los residuos de concreto asfáltico demolido por medio del procedimiento llamado "Hot Mix Asphalt Recycling", se presentarán los usos en Honduras del residuo de concreto asfáltico demolido, las leyes vigentes que regulan el manejo de este residuo, y las normativas utilizadas en Estados

Unidos de América para establecer la situación actual de la problemática y destacar las soluciones implementadas en otro país.

Adicionalmente, se dará a conocer el procedimiento de diseño del Departamento de Transporte de Estados Unidos de América replicado en el laboratorio de Ingeniería Civil para la elaboración de especímenes de concreto asfáltico reciclado. Así mismo, se presentarán las normativas que se implementaron para el desarrollo de los ensayos realizados a una mezcla con residuo de concreto asfáltico demolido para conocer sus propiedades mecánicas y como se comparan a las de una mezcla virgen.

II PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A continuación, se presentarán los precedentes del problema, la definición del problema, justificación, preguntas de investigación y los objetivos establecidos, planteados con el propósito de fundamentar el proyecto de investigación.

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

Según INE (2017), tal como puede observarse en la Ilustración 2, en 2013 la red vial nacional de Honduras contaba con 15,028 kilómetros. El mismo estudio, realizado 5 años después, de 2017 a 2021, indica que para 2021 se contaba con 17,088 kilómetros de carreteras, lo que incrementa la necesidad de mejorar la superficie de rodadura con soluciones como el concreto hidráulico o el concreto asfáltico para la red vial primaria y secundaria. El mismo estudio afirma que el concreto asfáltico es el más utilizado para proyectos de pavimentación, con un total de 6,321.07 kilómetros en la red principal y 2,109.35 kilómetros en la secundaria, cantidad superior que los 367.53 kilómetros de concreto hidráulico, tendencia que se mantiene ya que el concreto asfáltico es el más utilizado para este tipo de carreteras (INE, 2022).

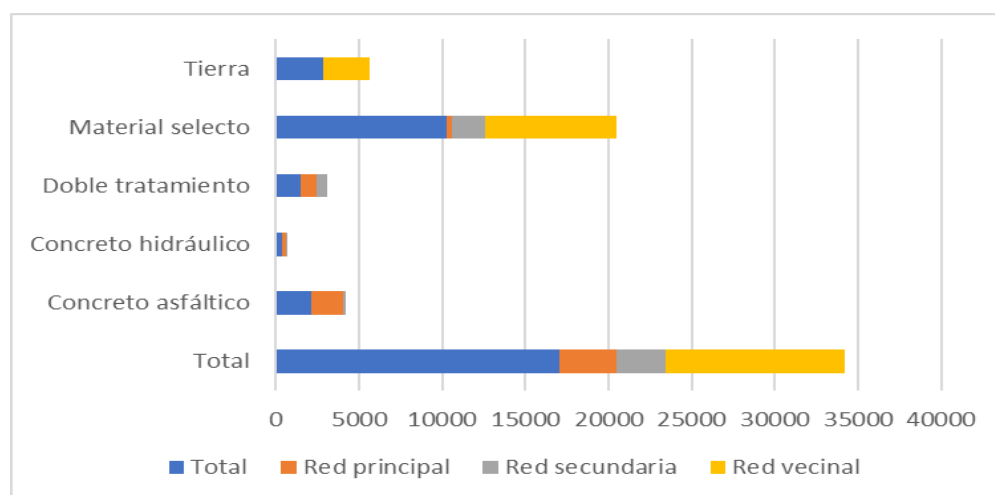


Ilustración 2. Red vial nacional, por tipo de calzada, según red (km)

Fuente: (INE, 2022)

Debido a que el concreto asfáltico prevalece en comparación al concreto hidráulico en la red vial nacional la demanda de concreto asfáltico irá en aumento; por causa del desempeño que el pavimento posee, se requieren trabajos de mantenimiento, bacheo y reconstrucción, con la necesidad de demoler la carpeta asfáltica por medios manuales, retroexcavadora o fresadora, lo que genera residuos de concreto asfáltico.

Ossa & García (2015) refiere que a nivel mundial se ha aumentado la producción de residuos de construcción y demolición (RDC) en las últimas décadas, lo cual es un problema ambiental debido a su desecho no regulado. Sin embargo, la aplicación de leyes y programas que promuevan la reutilización de estos materiales se han incorporado en países como Alemania, China, Holanda, Brasil, Chile, entre otros.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

INE (2022) menciona que en Honduras el concreto asfáltico es catalogado como un desecho sólido inerte de tipo demolición, donde el 90% de los desechos sólidos son depositados en botaderos al aire libre y solamente el 3% es depositado en botaderos controlados y semicontrolados, sin mencionar la disposición de desechos sólidos en establecimientos de reciclaje, tal como se refleja en la Ilustración 3.

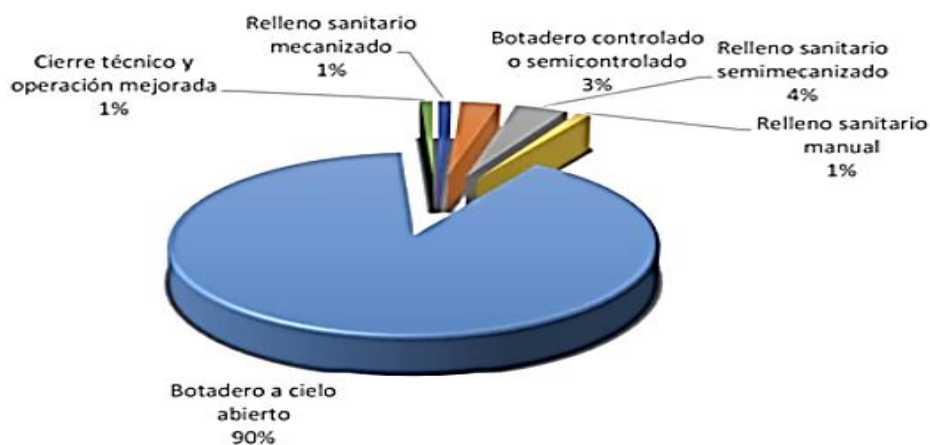


Ilustración 3. Mecanismos de disposición final de residuos sólidos en el país

Fuente: (INE, 2022)

La Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (2010) en el artículo 72 establece como ley: "Los residuos sólidos generados en obras de construcción y urbanizaciones deberán depositarse en lugares asignados por la Municipalidad" (p.13), sin embargo, no menciona el reciclaje del residuo de demolición de concreto asfáltico, por lo que es necesario analizar esta problemática.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Michaca, et al, (2001) afirman:

En el mundo contemporáneo es un grave problema los tiraderos de desperdicios, por lo que la reutilización de los materiales de un pavimento viejo, reciclándolos, evita el problema de buscarles un lugar adecuado para colocar dichos materiales que serían un desecho y que por tanto podrían ocasionar daños a la ecología del lugar. (p.62)

INE (2022) destaca en sus estadísticas que, en el país, la red vial en 15 departamentos está construida en su mayoría con concreto asfáltico con tendencia que, al aumentar la construcción de la red vial nacional, la construcción de pavimentaciones con concreto asfáltico seguirá. Esta información indica que el concreto asfáltico es un material altamente utilizado para una obra de construcción con demanda elevada, y al ser constituido por un componente derivado del petróleo, el suministro de esta mezcla cada vez será más difícil de abastecer la demanda si no se implementa el reciclaje.

SOPTRAVI (1996) menciona en el tomo 5 del Manual de Carreteras en la sección de detalles de construcción, la opción de realizar el pavimento asfáltico con material reciclado, sin embargo, la sección solamente especifica que este pavimento debe satisfacer los requerimientos de

materiales de una mezcla convencional. Así mismo, el manual sugiere la incorporación de un 30% a 70% de agregado virgen. Por último, el manual menciona que el ligante asfáltico nuevo, será seleccionado por el ingeniero a fines del empleo deseado. Por lo cual, sin un procedimiento detallado y solamente sugerencias técnicas en el proceso de diseño, las mezclas de concreto asfáltico reciclado son susceptibles a diseños empíricos e iterativos.

“Cuando el reciclado se realiza con procedimientos y proyectos adecuados, la calidad del pavimento reciclado es similar a la de un pavimento nuevo” (Michaca, Granados, Chaires, Hernández, & Gutierrez, 2001, pág. 1).

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1. ¿Cuál es el uso que se le da en Honduras al residuo del concreto asfáltico demolido?
2. ¿Existen leyes que determinen el procedimiento a seguir para el manejo de este residuo?
3. ¿Cuáles son las normativas que predominan en Estados Unidos de América para la reutilización del concreto asfáltico que es removido de calles y carreteras?
4. ¿Qué procedimientos se pueden replicar en el laboratorio para la calificación del residuo de concreto asfáltico?
5. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto asfáltico reciclado en comparación con una mezcla de concreto asfáltico virgen?

2.5 OBJETIVOS

En este apartado se presentará el objetivo general que se pretende alcanzar en el proyecto de investigación y los objetivos específicos correspondientes.

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer el proceso a seguir para diseñar una mezcla de concreto asfáltico con residuo de carpeta asfáltica demolida para utilizar como carpeta de rodadura, a partir de los resultados del ensayo Marshall, de acuerdo con normativas nacionales e internacionales.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Investigar los usos que se le da en Honduras al residuo de concreto asfáltico demolido por medio de entrevistas a ingenieros de campo en obras de repavimentación, con uso de dispositivos electrónicos y visitas de campo.
2. Investigar si existen leyes en Honduras en publicaciones oficiales que determinen el procedimiento a seguir para el manejo del residuo de concreto asfáltico, con uso de dispositivos electrónicos.
3. Investigar qué normativas nacionales e internacionales se utilizan para el reciclaje del residuo de concreto asfáltico.
4. Obtener las propiedades mecánicas de los residuos de concreto asfáltico, con uso de las normativas ASTM D2172, ASTM D422, ASTM C127, y equipo del laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC.
5. Comparar las propiedades mecánicas de los especímenes de concreto asfáltico reciclado vs de concreto asfáltico virgen, por medio de los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC.

III MARCO TEÓRICO

La fundamentación teórica para elaborar una mezcla de concreto asfáltico utilizando materiales reciclados en combinación a agregados nuevos, reside en los siguientes temas que se mostrarán a continuación.

3.1 PAVIMENTOS

El material que se recicla es el concreto asfáltico, proviene de la carpeta asfáltica la cual es una de las capas del pavimento flexible, por lo tanto, es de suma importancia para la investigación aprender sobre los pavimentos.

“Estructura formada por una o más capas de material pétreo tratado, cuya función es la de proporcionar al usuario un tránsito cómodo, seguro y rápido, al costo más bajo posible” (Martínez, 2007).

3.1.1 TIPOS DE PAVIMENTO

Los pavimentos tienen el funcionamiento de recibir directamente las cargas de tránsito, la forma en que la transmiten a las capas inferiores de su estructura depende del tipo de pavimento. Existen tres tipos de pavimentos, los cuales son: pavimentos rígidos, pavimentos flexibles, y pavimentos semirrígidos.

3.1.1.1 *Pavimento rígido*

El pavimento rígido está compuesto por dos capas, la losa de concreto y la subbase, las cuales irán encima de la subrasante. La losa de concreto está compuesta por concreto hidráulico, que es una mezcla de cemento, arena, grava y agua. Debido a que esta capa es rígida y tiene un alto módulo de elasticidad, la capacidad portante se basa en la losa más que en la subrasante, ya que en este tipo de pavimento no se utiliza capa de base (UNAM, 2020, p. 15).

La subbase tiene como función soportar, transmitir y distribuir las cargas que vienen de la carpeta asfáltica hacia la subrasante, de tal manera que la subrasante no se vea afectada. Además de esto, actúa como una capa de drenaje y controla la ascensión capilar de agua, esto funciona para poder proteger la losa de concreto. Es de suma importancia ya que si, el clima es helado, cuando el agua se congele se produciría un hinchamiento y si no se tiene una buena subbase se producirían daños en la losa. Normalmente la subbase está compuesta de materiales granulares (UNAM, 2020, p. 14).

La subrasante es la que soporta la estructura del pavimento, esta se va a extender a una profundidad donde la carga de diseño no se vea afectada. Esta capa se construye con cortes y rellenos, una vez hecho el corte o el relleno esta se compacta, luego de compactar se debe revisar que tenga las secciones transversales y pendientes correctas, que estas son especificadas en los planos finales. La calidad de la subrasante es de suma importancia, porque el espesor de la losa dependerá de ello, ya que, si no se tiene una buena calidad de subrasante, el espesor de la losa de concreto aumentara. Debido a esto la subrasante deberá cumplir con algunos requisitos, como, resistencia, incompresibilidad e inmunidad a la expansión y contracción por humedad. Es considerada como un tipo de cimentación para el pavimento, porque soporta cargas transmitidas y le da un sustento al pavimento (UNAM, 2020, p. 14).

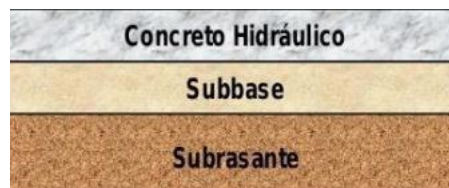


Ilustración 4. Capas de pavimento de concreto hidráulico

Fuente: (Barajas & Buitrago, 2017)

Las juntas, pasadores y barras de unión, son algunos de los componentes que se encuentran en el pavimento rígido. Las juntas determinan el tamaño que las losas tendrían, además de esto también ayudan para poder controlar las fisuras que se forman durante la edad temprana de la losa y cuando ya está en servicio. Sus funciones son, delimitar el tamaño de losas, brindar transferencia de carga, permitir el movimiento y dividir la construcción. La función de los pasadores es poder transferir cargas, pero al mismo tiempo no restringen el movimiento horizontal de las losas, los pasadores son barras de acero lisas. Al igual que los pasadores, las barras de unión también ayudan a la transferencia de carga, además de esto las barras de unión funcionan como anclajes, para poder unir una losa con otra (Giordani & Leone, 2023, p. 5).

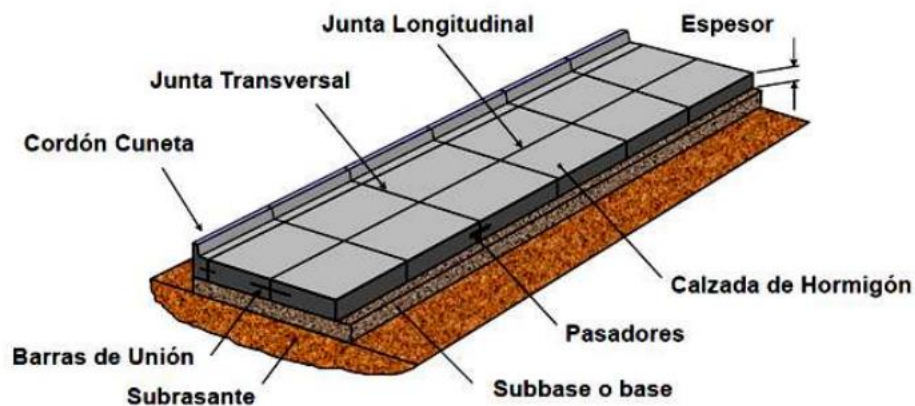


Ilustración 5. Componentes de pavimento rígido

Fuente: (Giordani & Leone, 2023)

“La alta rigidez de la losa de concreto le permite mantenerse como una placa y distribuir las cargas sobre un área mayor de la subrasante, transmitiendo presiones muy bajas a las capas inferiores” (Giordani & Leone, 2023, p. 6).

“En un pavimento rígido, debido a la consistencia de la superficie de rodadura, se produce una buena distribución de las cargas, dando como resultado tensiones muy bajas en la subrasante” (Miranda, 2010, p. 1).

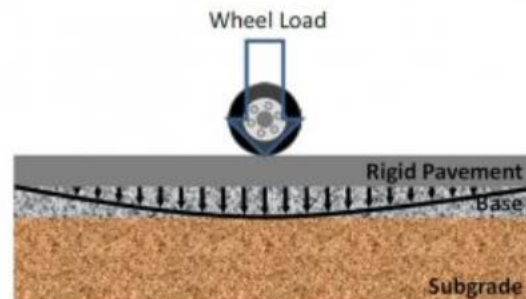


Ilustración 6. Distribución de cargas en pavimento rígido

Fuente: (Firth, 2018)

3.1.1.2 Pavimento flexible

El pavimento flexible está constituido por tres capas, carpeta asfáltica, base, y subbase, las cuales estas últimas dos normalmente son de un material granular, y estas capas descansan sobre la subrasante. La carpeta asfáltica está construida por un hormigón bituminoso, que es una mezcla de agregados y betún, o también puede ser mediante tratamientos superficiales. Está sometida a esfuerzos máximos debido al tráfico vehicular y a condiciones severas producidas por el clima (Giordani & Leone, 2023, p. 3).

Por debajo de la carpeta asfáltica se encuentra la base, que por lo general está compuesta de áridos, y estos puede que estén o no tratados con materiales como cemento, cal, asfalto, entre otros. La base tiene como función distribuir y soportar las cargas aplicadas, y las distribuye a la subbase. Luego se tiene la subbase, que de las tres capas es la que resulta económica, ya que,

está compuesta de materiales de menor calidad y costo. La subbase es la encargada de transmitir las cargas a la subrasante (Giordani & Leone, 2023, p. 3).



Ilustración 7. Capas de pavimento flexible

Fuente: (Ortiz, 2017)

“El pavimento flexible, está construido con materiales débiles y menos rígidos, más deformables, que transmiten a la subrasante las cargas de manera más concentrada, distribuyendo el total de la carga en menos área de apoyo” (Giordani & Leone, 2023, p. 6).

“La superficie de rodadura al tener menos rigidez, se deforma más y se producen mayores tensiones en la subrasante” (Miranda, 2010, p. 1).

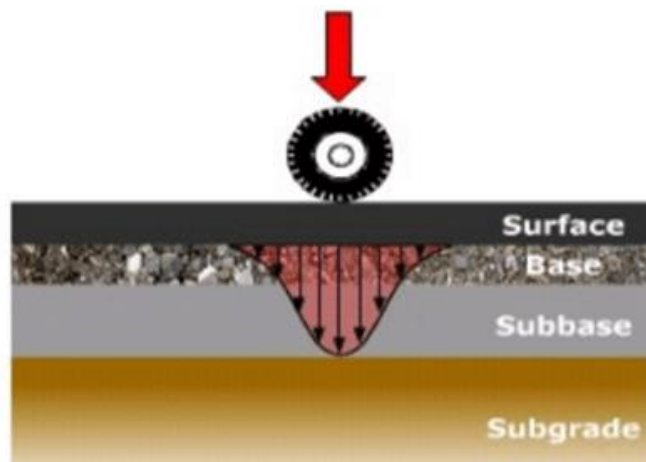


Ilustración 8. Distribución de cargas en pavimento flexible

Fuente: (Constructor, 2023)

Existen varios tipos de fallas que ocurren en el pavimento flexible, y se pueden dividir en diferentes categorías, como, desprendimientos, deformaciones, roturas y varios. Dentro de estas categorías se encuentran las fallas que se producen en el pavimento flexible, lo cual se presenta a continuación:

Los baches son huecos de diferentes tamaños que se producen en la carpeta asfáltica por desprendimiento o desintegración total, a medida que los vehículos transitan, los agregados se van desprendiendo, formando así un hueco, lo que se le conoce como bache. Las causas de este problema son por falta de resistencia de la carpeta, escasez de contenido de asfalto, espesor deficiente, drenaje deficiente y puntos débiles en la superficie (Téllez & Rico, 1991, p. 3).



Ilustración 9. Ejemplo de Bache

Fuente: (Banda, 2016)

Desprendimiento de agregados son depresiones en forma de cráter que se producen en la carpeta, esto debido a la separación de los agregados gruesos, lo que ocasiona que se generen huecos. Falta de afinidad de los agregados con el asfalto, escasez de asfalto y expansión del agregado grueso, son algunas de las causas probables para que se produzca el desprendimiento de agregados (Téllez & Rico, 1991, p. 6).



Ilustración 10. Desprendimiento de agregados

Fuente: (Grinkevich)

En la carpeta asfáltica se produce un problema llamado pulido de superficie, el pulido de superficie es cuando la carpeta empieza a tener un desgaste acelerado, y esto produce que se formen áreas lisas en la superficie. Las causas que ocasionan este tipo de falla, es el tránsito intenso, agregado grueso con baja resistencia al desgaste, excesiva compactación y mezclas con contenido de asfalto alto (Téllez & Rico, 1991, p. 9).



Ilustración 11. Pulido de superficie

Fuente: (Tipos de fallas en pavimento flexible, 2014)

La desintegración, es cuando la capa asfáltica se va deteriorando en pequeños fragmentos, y a su vez perdiendo los materiales que la componen. Esto puede ocurrir por varios factores, como, la carpeta asfáltica llegó a su vida útil, tránsito intenso y pesado, contaminación de

agregados, bajo contenido de asfalto, presencia de arcilla en las capas, envejecimiento y fatiga, y una compactación insuficiente (Téllez & Rico, 1991, p. 10).

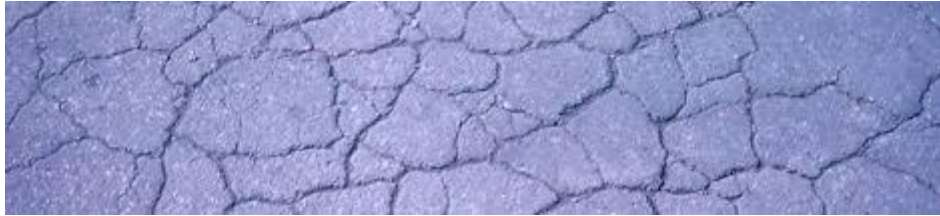


Ilustración 12. Desintegración

Fuente: (Corredor & Corros, 2010)

La siguiente falla es conocida como roderas o canalizaciones, esto se produce en el sentido longitudinal de la capa, y se produce en el lugar por donde transitan los vehículos frecuentemente, esto es debido a asentamiento o deformación permanente en la carpeta asfáltica. Baja estabilidad de la carpeta, mala compactación y consolidación de una o varias capas del pavimento, son causas que pueden ayudar a la formación de canalizaciones (Téllez & Rico, 1991, p. 15).



Ilustración 13. Roderas o canalizaciones

Fuente: (Pérez & Urrea)

Agrietamiento piel cocodrilo, son fisuras que forman un patrón regular con polígonos que pueden ser de hasta 20 centímetros, estas fisuras producen una imagen similar a la de la piel de

un cocodrilo. Esta falla es ocasionada por fatiga, envejecimiento, escasez de espesor de la carpeta asfáltica, debilidad del pavimento y un soporte inadecuado de la base (Téllez & Rico, 1991, p. 28).



Ilustración 14. Agrietamiento piel cocodrilo

Fuente: (Zapata)

Cuando se produce una liberación de asfalto hacia la superficie de la carpeta asfáltica, a esto se le conoce como llorado de asfalto, y forma una capa peligrosa en la superficie, también se puede dar a través del ascenso del asfalto a través de las grietas formadas en la carpeta. Esto se produce por exceso de asfalto, excesiva compactación, y sobredosificación de riego de liga (Téllez & Rico, 1991, p. 34).



Ilustración 15. Llorado de asfalto

Fuente: (Consejo De Directores De Carreteras De Iberia E Iberoamérica, 2002)

3.1.2 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Para el diseño de pavimento flexible se utiliza el método AASHTO-93. Con este método a través de una ecuación se encuentra el número estructural, denominado SN. El número estructural en este método es de suma importancia, ya que, con este, posteriormente se encontrarán los espesores de las capas, capa asfáltica, capa de base y capa de subbase (García, 2015, p. 3).

A continuación, se muestra la ecuación del número estructural:

$$\text{Log}(W) = ZR * S_o + 9.36 * \text{Log}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\text{Log}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \text{Log}(MR) - 8.07$$

Ecuación 1- Número estructural

Fuente: (García, 2015)

Las variables son las siguientes:

W: Número estimado de ejes equivalentes de 8.2 toneladas en el periodo de diseño

ZR: Desviación estándar normal

So: Error estándar combinado de la predicción del tráfico y de la predicción del comportamiento estructural

ΔPSI: Diferencia entre índice de servicio inicial y final

MR: Módulo resiliente (en libras/pulgada²)

SN: Número estructural (García, 2015).

Con esta primera ecuación se obtiene el número estructural, que se utilizará para determinar los espesores de las capas, que estos deben de igualar o superar el número estructural calculado a partir del módulo resiliente de la subrasante. En la segunda ecuación, que a

continuación se presentará, se encuentra la variable a, que se puede definir como la relación entre el número estructural y el espesor de la capa. Otra manera de definirlo es la capacidad que tiene el material para poder funcionar como un componente estructural en el pavimento (García, 2015, p. 4).

A continuación, se muestra la segunda ecuación:

$$SN = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Ecuación 2- Obtención del espesor de capa

Fuente: (García, 2015)

Variables:

a: Coeficiente estructural de la capa

D: Espesor de la capa en pulgadas

m: Coeficiente de drenaje de la capa (García, 2015).

Para poder obtener la variable a1, que es el coeficiente de la mezcla asfáltica, se tiene que utilizar una gráfica que está en función del módulo de elasticidad de la mezcla asfáltica, y está en libras/pulgada². Teniendo el módulo de elasticidad, se puede utilizar la gráfica, y de este modo se obtiene el valor de coeficiente estructural de la capa asfáltica. Cabe destacar que este valor es adimensional. La gráfica mostrada a continuación, es solo para una temperatura de mezcla asfáltica de 20°C (García, 2015, p. 4).

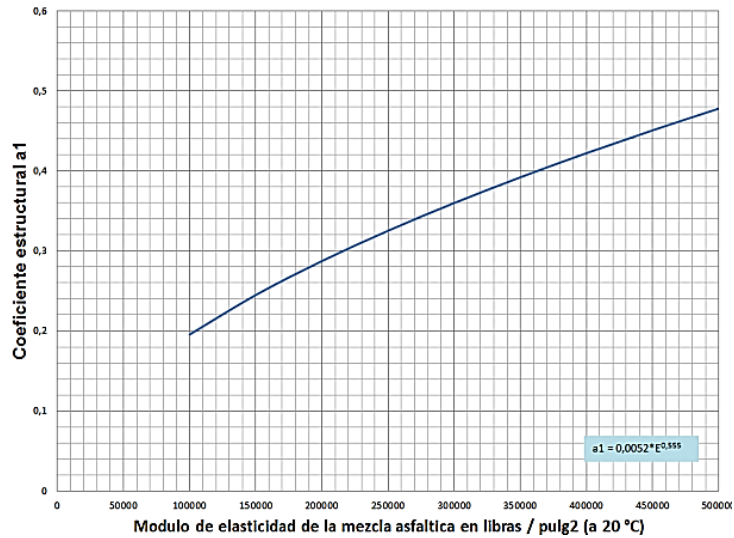


Ilustración 16. Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la capa asfáltica

Fuente: (García, 2015)

García (2015) menciona que, para obtener el coeficiente estructural de la base y subbase, se utilizan gráficas igual que en la obtención del coeficiente estructural de la capa asfáltica, estas gráficas son similares entre sí, pero diferente a la gráfica utilizada en la capa asfáltica. El a2 se refiere al coeficiente estructural de la base, y el a3 al coeficiente estructural de la subbase.

A continuación, se muestra las respectivas gráficas para cada coeficiente:

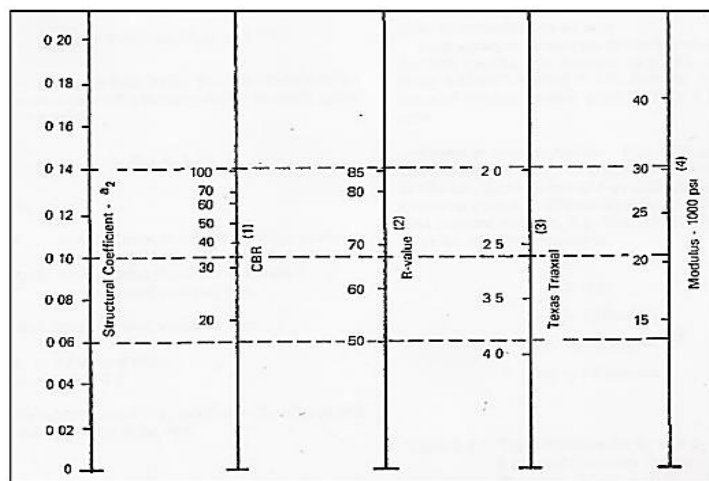


Ilustración 17. Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la base

Fuente: (García, 2015)

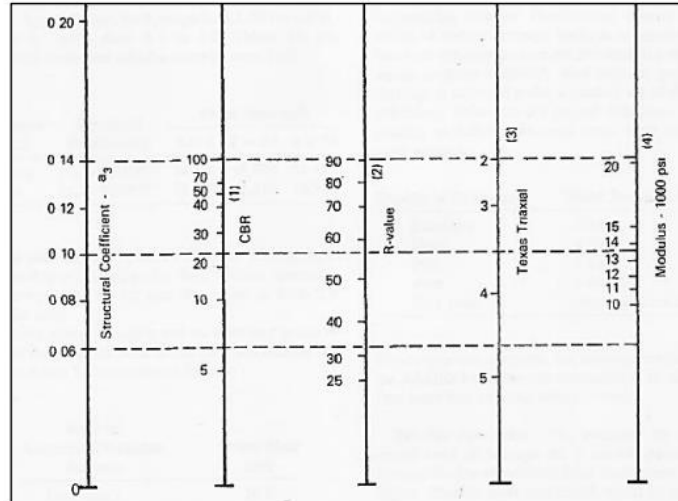


Ilustración 18. Gráfica para determinar el coeficiente estructural de la subbase

Fuente: (García, 2015)

“Para la obtención de los coeficientes de drenaje de los materiales de base y subbase se emplean los criterios recomendados por la AASHTO de acuerdo con la tabla 1” (García, 2015, p. 6).

Tabla 1. Tabla para determinar el coeficiente de drenaje

Características del drenaje	Agua evacuada en	Porcentaje de tiempo en el año, que la estructura de pavimento está expuesta a un nivel de humedad			
		<1%	1%-5%	5%-25%	>25%
Excelente	2 horas	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.2
Bueno	1 día	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Regular	1 semana	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.8
Pobre	1 mes	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.6
Muy malo	No drena	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.4

Elaboración propia, Fuente: (García, 2015)

Al tener todas las variables, se procede a calcular los espesores de las capas. El primer espesor que se obtendrá será el de la carpeta asfáltica, luego el espesor de la base y por último el espesor

de la subbase. Cabe destacar que en cada ecuación se despejará para el espesor de la capa correspondiente.

A continuación, se muestra el procedimiento que se sigue para cada espesor:

$$SN_{base} = a_1 * D_1$$

Ecuación 3- Espesor carpeta asfáltica

Fuente: (Funes, 2023)

$$SN_{subbase} = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2$$

Ecuación 4- Espesor de la base

Fuente: (Funes, 2023)

$$SN_{subrasante} = a_1 * D_1 + a_2 * D_2 * m_2 + a_3 * D_3 * m_3$$

Ecuación 5- Espesor de la subbase

Fuente: (Funes, 2023)

AASHTO proporciona espesores mínimos sugeridos para la carpeta asfáltica y para la capa de base. Los valores en la tabla dependen del número de ESAL's con el que se está realizando el diseño (Funes, 2023).

A continuación, se presenta la tabla sugerida por el AASHTO:

Tabla 2. Espesores mínimos sugeridos

Número de ESAL's	Capas asfálticas	Base granular
Menos de 50,000	3.0 cm	10 cm
50,000-150,000	5.0 cm	10 cm
150,000-500,000	6.5 cm	10 cm
500,000-2,000,000	7.5 cm	15 cm
2,000,000-7,000,000	9.0 cm	15 cm
Más de 7,000,000	10.0 cm	15 cm

Elaboración propia, Fuente: (Funes, 2023)

3.1.3 AGREGADOS UTILIZADOS EN PAVIMENTACIÓN

Feuling (2021) afirma:

Los agregados son materias primas que se producen a partir de fuentes naturales y se extraen de pozos y canteras, incluida la grava, la piedra triturada y la arena. Cuando se utilizan con un medio aglutinante, como agua, cemento y asfalto, se utilizan para formar materiales compuestos, como hormigón asfáltico y hormigón de cemento portland

Los tipos de agregados son los siguientes:

- Agregados naturales: son aquellos que se utilizan solamente después de una modificación de su distribución de tamaño para adaptarse a las exigencias según su disposición final.
- Agregados de trituración: son aquellos que se obtienen de la trituración de diferentes rocas de cantera o de las granulometrías de rechazo de los agregados naturales. Se incluyen todos los materiales canterables cuyas propiedades físicas sean adecuadas.
- Agregados artificiales: son los subproductos de procesos industriales, como ciertas escorias o materiales procedentes de demoliciones, utilizables y reciclables.
- Agregados marginales: los agregados marginales engloban a todos los materiales que no cumplen alguna de las especificaciones vigentes (Padilla, 2004, p. 5).

Los agregados se pueden clasificar de acuerdo con su tamaño, agregado grueso, agregado fino y filler. A continuación, se presenta el agregado grueso:

“Según el sistema de clasificación de suelos SUCS, se define como agregado grueso, a la parte del agregado pétreo total que queda retenido en el tamiz #4” (Padilla, 2004, p. 11).

Padilla (2004) menciona que la forma del agregado grueso varía para las mezclas asfálticas. Las formas ideales que estas deben de presentar, es en formas de cuboides, que a lo que se refiere

con este tipo de forma es que se eviten las formas planas y alargadas. Este tipo de forma se debe de evitar ya que, cuando la mezcla se encuentra bajo cargas, si el agregado tiene este tipo de forma será muy probable que se quiebre.

Este tipo de agregado debe de cumplir con cierta resistencia al desgaste, por lo que, Padilla (2004) afirma: "los agregados pétreos deben de cumplir con un cierto mínimo de resistencia a la fragmentación o al desgaste, lo que da una orientación del comportamiento que tendrá dicho agregado dentro de la mezcla asfáltica al entrar en servicio el pavimento" (p. 12).

Al momento de ser utilizado, el agregado grueso debe de estar limpio, por lo que, no deberá tener arcilla, materia vegetal, u otras materias que puedan afectar la durabilidad de la capa. Para evitar que la capa se vea afectada, hay un mínimo de contenido de impurezas, que es dado por la normativa, este mínimo es del 0.5% en masa, por lo tanto, se deberá de realizar una limpieza inicial al agregado antes de ser utilizado (Padilla, 2004, p. 13).



Ilustración 19. Agregado grueso

Fuente: (360 En Concreto)

El siguiente agregado es el agregado fino:

“Según el sistema de clasificación de suelos SUCS, se define como agregado fino, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #4 y queda retenido en el tamiz #200” (Padilla, 2004, p. 13).

El agregado fino proviene de la trituración de piedra de cantera o puede provenir de grava natural, también el agregado fino se puede encontrar en fuentes naturales. Si el agregado fino proviene de yacimientos naturales, existen limitaciones al momento de utilizarlos en mezclas. Normalmente la arena natural se utiliza para pavimentos con baja intensidad de tráfico y bajos niveles de cargas. La limitación del agregado fino natural se hace porque puede que exista una disminución de la rigidez final en la mezcla (Padilla, 2004, p. 13).

Antes de poder utilizar el agregado fino, a este se le debe de realizar una limpieza.

Padilla (2004) afirma: “El agregado fino deberá ser exento de terrones de arcilla, materia vegetal, marga y otras materias extrañas, para evitar que se presenten comportamientos extraños del material dentro de la mezcla” (p. 14).

Cuando el agregado fino es triturado, el material a triturar debe de cumplir con condiciones sobre el coeficiente de desgaste de Los Ángeles. Hay dos rangos de coeficientes de desgaste de agregado grueso que se emplearán para ser triturados, el primer rango es cuando el material a triturar se utilizará en capas de rodadura, y este coeficiente de desgaste deberá ser inferior a 25%. Cuando el material se utilice para capas de base el coeficiente de desgaste será inferior de 30%. En caso de que se necesite mejorar alguna característica, por ejemplo, la adhesividad, se recomienda utilizar un agregado fino de otra naturaleza (Padilla, 2004, p. 14).



Ilustración 20. Agregado fino

Fuente: (Instituto Tecnológico de Tijuana, 2021)

Por último, se tiene el agregado que se le conoce como polvo mineral o filler:

“Según el sistema de clasificación de suelos SUCS, se define como polvo mineral, a la parte del agregado pétreo total que pasa el tamiz #200” (Padilla, 2004, p. 14).

El filler se puede obtener de dos formas, siendo la primera de un producto comercial, que puede provenir del cemento o cenizas volantes de central térmica. Cuando es así, se puede tener un mayor control sobre el filler, ya que, se conocen sus propiedades químicas y físicas, y se puede conocer el comportamiento que este tendrá en la mezcla. Por otra parte, el filler también se puede obtener de plantas asfálticas, que en este caso el filler sería un material de recuperación de estas. Si es un material recuperado, hay cierta incertidumbre con el material, ya que, no se conocen sus componentes y su composición puede variar, esto debido a que es un residuo (Padilla, 2004, p. 14).

Al ser un material sumamente fino, el filler tiene la capacidad de reducir el volumen de vacíos en una mezcla, ya que ocupa esos espacios libres que se generan en la mezcla, de esta forma también evita que aumente la cantidad de ligante asfáltico a utilizar (Padilla, 2004, p. 15).

Padilla (2004) afirma: "El empleo del polvo mineral incrementa la magnitud de la resistencia a la deformación de la mezcla, sin modificar la naturaleza viscosa del ligante, originando como consecuencia un aumento de la resistencia al corte de las mezclas asfálticas" (p. 15).



Ilustración 21. Filler o polvo mineral

Fuente: (Ecivil, 2023)

3.2 ASFALTO

"El asfalto es un material negro, cementante, que varía ampliamente en consistencia, entre sólido y semisólido (sólido blando), a temperaturas ambientales normales" (UNAM, 2006, pág. 3).

Es el agregado principal de la mezcla que se pretende diseñar. Conocer las funciones en la construcción, el surtido existente y su disponibilidad en el futuro, es fundamental para la argumentación del tema de investigación.



Ilustración 22. Mina de asfalto natural en Pesca-Boyacá

Fuente: (Velandia, 2019)

3.2.1 APLICACIONES DEL ASFALTO EN LA CONSTRUCCIÓN

The Asphalt Institute (1973) describe al asfalto como un material de interés peculiar para el ingeniero debido a las diversas propiedades como aglomerante resistente, adhesivo, altamente impermeable, duradero, entre otras propiedades que convierten al asfalto en un material con diversas aplicaciones en la construcción. El asfalto puede utilizarse en: pavimentos, accesorios de carreteras, revestimientos y obras hidráulicas; también es utilizado en impermeabilizaciones y estabilizaciones de suelos (Biviano, 2019).

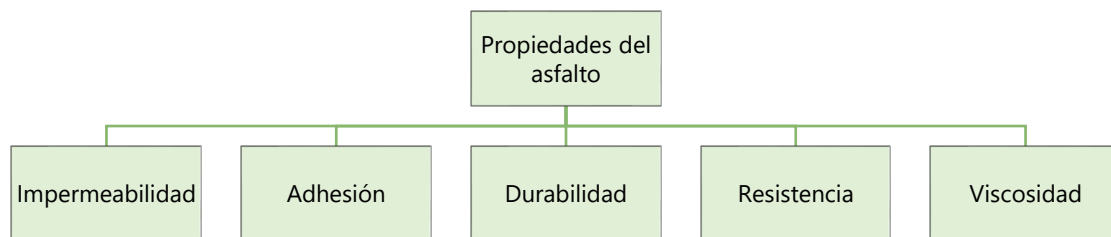


Ilustración 23. Propiedades físicas del asfalto

Elaboración propia. Fuente: (UNAM, 2006)

3.2.1.1 *Asfalto como material para pavimentos y tratamientos superficiales*

“El asfalto usado en pavimentación, llamado ‘cemento asfáltico’ es un material viscoso y pegajoso. Se adhiere fácilmente a las partículas de agregado y es un excelente cemento para unir partículas de agregado en un pavimento de mezcla en caliente” (UNAM, 2006, pág. 3).

Martínez (2007) menciona que el asfalto es utilizado en carpetas para los pavimentos tipo flexibles, los cuales están compuestos de una capa asfáltica de rodadura, base y de la subbase, cada una de grosores definidos en el diseño del pavimento. El asfalto utilizado en los pavimentos flexibles se clasifica según el tipo de mezcla utilizada para la elaboración de la carpea de

rodadura, estas se clasifican como: mezcla en caliente o concreto asfáltico, emulsión, mezcla en frío y carpetas de riego.

Además del uso del asfalto en carpetas de rodadura, este material posee propiedades que posibilita su uso en diversas aplicaciones en obras de pavimentación, las cuales son:

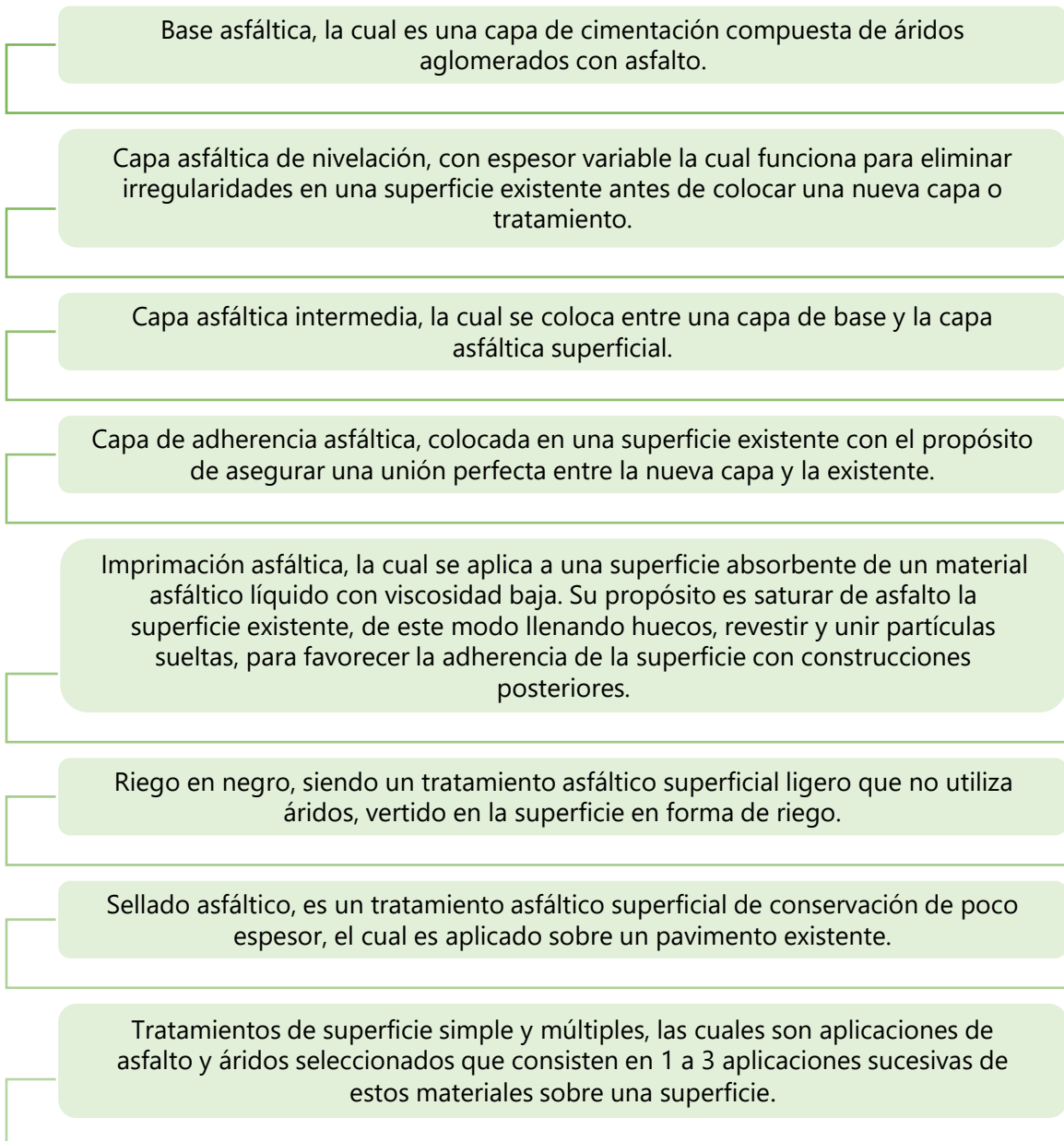


Ilustración 24. Usos del asfalto en pavimentaciones

Elaboración propia, Fuente: (The Asphalt Institute, 1973).

3.2.1.2 Impermeabilizaciones con asfalto

“Debido a sus propiedades fisicoquímicas, una de las aplicaciones que más se lleva a cabo en la construcción es la impermeabilización con asfalto, en sus diferentes presentaciones” (Biviano, 2019, pág. 7).



Ilustración 25. Impermeabilización de suelo con asfalto

Fuente: (Vastarintama, 2021)

The Asphalt Institute (1973) afirma:

Las cifras del Departamento de Comercio de los Estados Unidos indican que del 85 al 90% de todas las impermeabilizaciones de techados de los Estados Unidos son actualmente tipo asfáltico. Este procedimiento se refleja en una constante y apreciable crecimiento anual en la cantidad de asfalto empleada por esta industria.

3.2.1.3 Asfalto en obras hidráulicas

The Asphalt Institute (1973) menciona que la diversidad del asfalto se ha expandido a muchas modalidades en su implementación en obras hidráulicas. Desde revestimientos de canales y torrentes como se muestra en la Ilustración 26, revestimientos de depósitos de fluidos y piscinas, revestimientos en escolleras, presas, depósitos de aguas industriales y sistemas de tratamientos de desechos y residuos.



Ilustración 26. Revestimiento con asfalto de canal abierto

Fuente: (Allcons, 2023)

3.2.2 TIPOS DE ASFALTOS UTILIZADOS EN PAVIMENTOS

Los asfaltos utilizados en los pavimentos flexibles son clasificados en tres generales tipos: cemento asfáltico, asfalto rebajado y emulsiones asfálticas, cada uno con cualidades y funcionamiento específicos que los distingue entre ellos.



Ilustración 27. Cemento asfáltico

Fuente: (Pragmacromatic, 2023)

3.2.2.1 *Cemento asfáltico*

UNAM (2006) enuncia:

Los cementos asfálticos son asfaltos obtenidos del proceso de destilación del petróleo para eliminar solventes volátiles y parte de sus aceites. Su viscosidad varía con la

temperatura y entre sus componentes, las resinas le producen adherencia con los materiales pétreos, siendo excelentes ligantes, pues al ser calentados se licúan, lo que les permite cubrir totalmente las partículas del material pétreo.

Los cementos asfálticos son utilizados en mezclas de concreto asfáltico, también llamadas mezclas en caliente. Se utilizan en carpetas, morteros y estabilizaciones; así mismo, estas mismas son utilizadas en la elaboración de emulsiones y asfaltos rebajados. Estos son clasificados en base a tres propiedades: viscosidad, viscosidad al envejecer y penetración. Las normas utilizadas para clasificación del cemento asfáltico son: la norma AASHTO M 226, la cual clasifica el asfalto según su viscosidad a los 60°C, como se puede observar en la Tabla 3; y la norma AASHTO M 20, representada en la Tabla 4, la cual clasifica el asfalto según su grado de penetración (UNAM, 2006).

Tabla 3. Requisitos para cemento asfáltico por viscosidad a 60°C (AASHTO M 226)

PRUEBA	GRADO DE VISCOSIDAD					
	AC- 2.5	AC- 5	AC - 10	AC - 20	AC - 30	AC - 40
Viscosidad, 60° poises	250-50	500 _± 100	1000 _± 200	2000 _± 400	3000 _± 600	4000 _± 800
Viscosidad 135° Cs-mínima	125	175	250	300	350	400
Penetración, 25° C 100 g.,5 segundos - mínimo	220	140	80	60	50	40
Punto inflamador, cleveland. °C(°F)-mínimo	163(325)	177(350)	219(425)	232(450)	232(450)	232(450)
Solubilidad en tricloroetileno, por cierto-mínimo	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Pruebas sobre el residuo del ensayo TFO:						
Perdida por calentamiento, porcentaje-maximo (opcional) ³		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5
Viscosidad, 60° C, poises - máximos	1000	2000	4000	8000	12000	16000
Ductilidad, 25° C, 5 cm por minuto, cm mínimo	100 ¹	100	75	50	40	25
Prueba de mancha (cuando y como se especifique) ² con :						
Solvente normal de nafta	Negativo para todos los grados					
Solvente de nafta-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					
Solvente de heptano-xileno, % xileno	Negativo para todos los grados					

(AASHTO, 2004)

Tabla 4. Clasificación para cemento asfáltico por penetración (AASHTO M 20)

GRADO DE PENETRACIÓN										
	40 – 50		60 – 70		85 – 100		120 – 150		200 – 300	
	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max	Min.	Max
Penetración, 25° C 100 g., 5 segundos	40	50	60	70	85	100	120	150	200	300
Punto inflamador, cleveland, °C	450	-	450	-	450	-	425	-	350	-
Ductilidad 25° C, 5 cm por minuto	100	-	100	-	100	-	100	-	-	-
Solubilidad de triclorotileno, por ciento	99	-	99	-	99	-	99	-	99	-
TFO 3.2 mm, 63° C, 5 horas										
Perdida por calentamiento, Por ciento	-	0.8	-	0.8	-	1.0	-	1.3	-	1.5
Penetración del residuo, Por ciento del original	58	-	54	-	50	-	46	-	40	-
Ductilidad del residuo a 25° C. 5 cm por min., cm	-	-	50	-	75	-	100	-	100	-
Prueba del mancha (cuando y como se específica) (ver nota) : Solvente normal del nafta Solvente de nafta – xileno. % xileno Solvente de heptano – xileno. % xileno	Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados Negativo para todos los grados									

(AASHTO, 2004)

3.2.2.2 *Asfalto rebajado*

Según The Asphalt Institute (1973), los asfaltos rebajados son mezclas de cemento asfáltico combinado con fracciones del petróleo, estas son denominadas solventes o diluentes. La función de los solventes es fluidificar el cemento asfáltico para posibilitar la aplicación a los materiales pétreos en frío, para luego ser eliminados y permitir el trabajo del cemento asfáltico

El asfalto rebajado se categoriza en tres tipos dependiendo del solvente utilizado en la preparación, clasificados según la velocidad de fraguado, los cuales son:

- Asfalto rebajado de fraguado rápido (FR).
- Asfalto rebajado de fraguado medio (FM).
- Asfalto rebajado de fraguado lento (FL) (UNAM, 2006).

3.2.2.3 *Asfalto emulsificado*

“Una emulsión asfáltica consiste en tres ingredientes básicos: asfalto, agua y un agente emulsivo. En algunas ocasiones, la emulsión puede contener otros aditivos, como estabilizantes, mejoradores de recubrimientos, mejoradores de adherencia, o agentes de control de rotura” (Instituto del Asfalto, 2001, pág. 5).

El Instituto del Asfalto (2001) clasifica las emulsiones asfálticas en tres categorías: aniónica, catiónica, y no iónica. Siendo las primeras dos (aniónica y catiónica), las más utilizadas en la construcción y mantenimiento de carreteras. El Instituto del Asfalto menciona que estas denominaciones se refieren a las cargas eléctricas, basadas en una ley de electricidad- las cargas opuestas se atraen y las iguales se repelen. Cuando se hace pasar una corriente eléctrica por las emulsiones asfálticas aniónicas, las partículas de asfalto se desplazan hacia el ánodo, lo que significa que poseen cargas negativas. Las emulsiones catiónicas se denominan de este modo, ya que poseen cargas positivas (UNAM, 2006).

3.2.3 DEMANDA DE ASFALTO

EMR (2022) afirma:

El mercado mundial del asfalto fue impulsado por la creciente actividad de la construcción en el periodo histórico. Con la ayuda del uso de asfalto en las autopistas de todo el mundo y el creciente énfasis en el desarrollo de infraestructura, se espera que el mercado experimente un mayor crecimiento en el período de pronóstico de 2023-2028, creciendo a una tasa compuesta anual del 5.3%.

3.3 CONCRETO ASFÁLTICO

El objetivo del proyecto es diseñar mezclas de concreto asfáltico reciclado. El procedimiento de diseño para elaborar una mezcla de concreto asfáltico es la base de la investigación, ya que es el ensayo principal por realizar en el laboratorio de Ingeniería Civil. Conocer las propiedades, elaboración en planta, y las obras realizadas para el mantenimiento del pavimento de este material, es esencial para la familiarización con el material que se pretende trabajar.



Ilustración 28. Concreto asfáltico recién colocado

Fuente: (Asfaltos Kean, 2023)

Se define como mezcla bituminosa en caliente tipo hormigón bituminoso la combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos con granulometría continua y, eventualmente, aditivos, de manera que todas las partículas del árido queden recubiertas por una película homogénea de ligante. Su proceso de fabricación implica calentar el ligante y los áridos y su puesta en obra debe realizarse a una temperatura muy superior al ambiente (España, Ministerio de Fomento de, 2008, pág. 1).

3.3.1 MÉTODO MARSHALL PARA DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO

“El método Marshall utiliza especímenes de prueba estándar de una altura de 2 ½” y 4” de diámetro. Se preparan mediante un procedimiento específico para calentar, mezclar y compactar mezclas utilizando la norma ASTM D1559 (Anguas, et al. 2004, pág. 3).

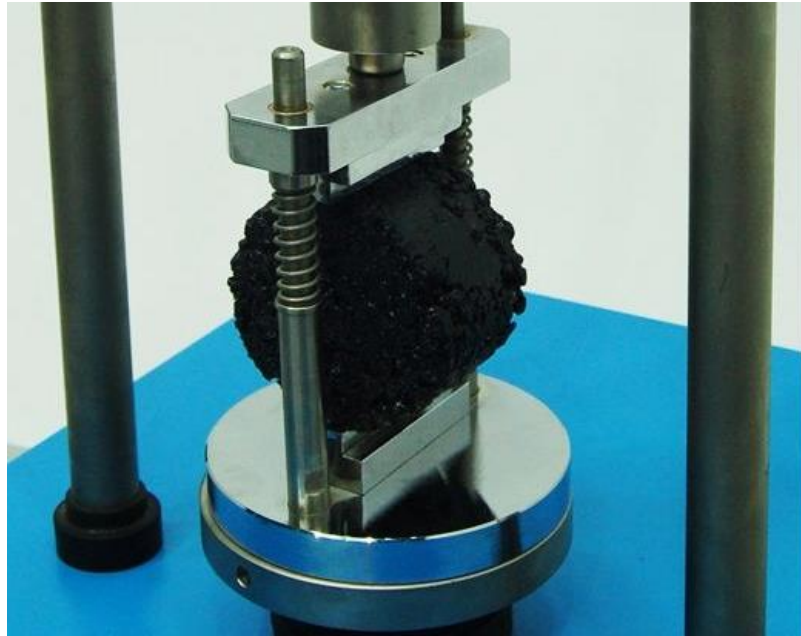


Ilustración 29. Espécimen de prueba en máquina estabilizadora Marshall

Fuente: (Utest, 2023)

El diseño de la mezcla sigue una metodología compuesta por una serie de segmentos realizados en orden específico, que garantiza un proceso adecuado para la elaboración de una mezcla que cumpla las especificaciones deseadas. El procedimiento del Método Marshall comienza con la preparación de los materiales para elaborar los especímenes de prueba. Sin embargo, antes de esto se requiere:

- Que los materiales a utilizarse cumplan con los requisitos de las especificaciones.
- Que la combinación de los agregados cumpla con los requisitos de gradación de las especificaciones.
- Determinar la gravedad específica Bulk de los agregados utilizados en la mezcla y la gravedad específica del concreto asfáltico, para realizar los análisis de densidad y vacíos (UNITEC, 2023).

3.3.1.1 Granulometría de los agregados

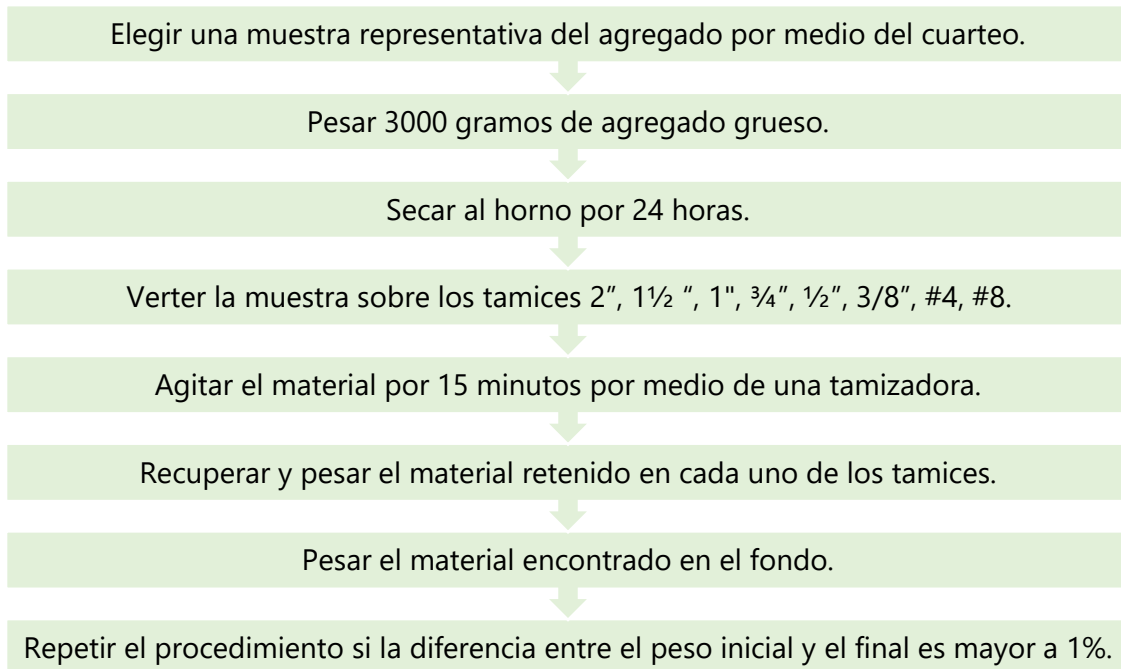
Anguas, et al. (2004) explican que, el método Marshall hace uso de una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en la cual en su eje x se encuentran las aberturas de los tamices en mm y el porcentaje de pase del material en el eje y. La normativa ASTM D3515 muestra los tamaños máximos nominales más utilizados, como se puede observar en la Tabla 5.

Tabla 5. Graduaciones propuestas para mezclas cerradas (ASTM D3515)

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2in (50mm)	1½ in. (37.5 mm)	1 in. (25.0mm)	¾ in. (19.0mm)	½ in. (12.5mm)	3/8 in. (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36mm)	No. 15 (1.18mm)
Graduaciones para mezclas de agregados grueso, fino y filler									
2 ½ in. (53mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2 in. (60mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½ in. (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1 in. (25.0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾ in. (19.0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½ in. (12.5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8 in. (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
No. 4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	65-85	80-100	-	100
No. 8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	26-56	32-67	65-100	-	95-100
No. 15 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
No. 30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	35-65	-	70-95
No. 50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
No. 100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
No. 200 (75µm)	0-6	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

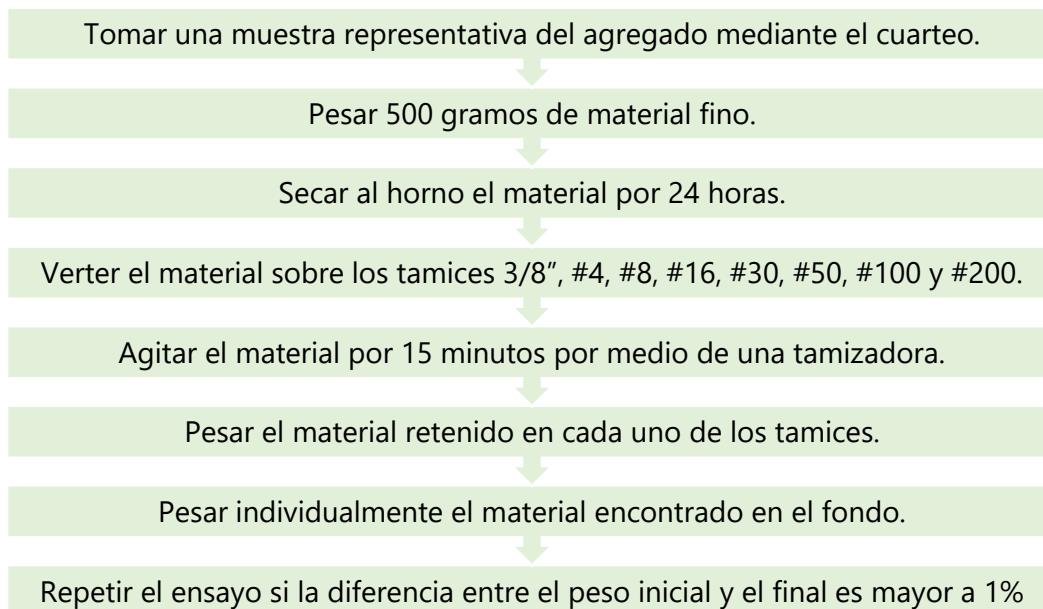
Elaboración propia, fuente: (Anguas, Alamilla, López, Romero, & Orca, 2004)

3.3.1.1 Procedimiento de granulometría del agregado grueso:



Fuente: (UNITEC, 2023)

3.3.1.2 Procedimiento de granulometría del agregado fino:



Fuente: (UNITEC, 2023)

3.3.1.1.3 Cálculos referentes al ensayo de granulometría

Al obtener los datos registrados en el ensayo de laboratorio, se procede a realizar los cálculos que se muestran posteriormente, los cuales son utilizados para completar los datos requeridos que se muestran en blanco en la Tabla 6 y Tabla 7.

La masa retenida acumulada en cada tamiz es calculada por medio de la Ecuación 6, donde x es el número de orden de cada tamiz.

$$Masa\ retenido\ acumulada_{Tamiz\ x} = \sum_1^{x-1} Peso\ retenido_{tamiz}$$

Ecuación 6- Masa retenida acumulado en el tamiz x

El porcentaje de error obtenido en los ensayos de laboratorio debe ser menor a 1%. Este porcentaje se obtiene por medio de la Ecuación 7, donde M_f (masa final) es la masa total luego de haber realizado el tamizado y M_i es la masa inicial.

$$\%error = \left(1 - \frac{M_f}{M_i}\right) * 100 < 1\%$$

Ecuación 7- Porcentaje de error

Fuente: (UNITEC, 2023).

El porcentaje de agregado retenido acumulado se calcula para todos los tamices utilizados en la granulometría y se obtiene por medio de la Ecuación 8. donde %Ra es el porcentaje de masa retenida acumulada.

$$\%Ra = \left(\frac{Masa\ retenida\ acumulada}{Masa\ total}\right) * 100$$

Ecuación 8- Porcentaje de masa retenida acumulada

Fuente: (UNITEC, 2023).

El porcentaje de pase se obtiene utilizando la Ecuación 9.

$$\%pase = 100\% - \%Ra$$

Ecuación 9- Porcentaje de pase

Fuente: (UNITEC, 2023).

Los resultados obtenidos de las ecuaciones para granulometría gruesa y fina son tabulados en las siguientes tablas correspondientes:

Tabla 6. Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Tamaño del tamiz mm	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	%Pase
2"	50			
1 1/2"	37.5			
1"	25			
3/4"	19			
1/2"	12.5			
3/8"	9.5			
#4	4.75			
#8	2.36			
Fondo				
Total				

Fuente: (UNITEC, 2023).

Tabla 7. Granulometría del agregado fino

Tamiz	Tamaño del tamiz mm	Peso retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	%Pase
3/8"	9.5			
#4	4.75			
#8	2.36			
#16	1.18			
#30	0.6			
#50	0.3			
#100	0.15			
#200	0.075			
Fondo				
Total				

Fuente: (UNITEC, 2023).

Las especificaciones establecen un tamaño máximo del agregado analizado, por lo tanto, se debe determinar el tamaño más grande de las partículas. El tamaño máximo se determina de la siguiente manera:

- Tamaño máximo, determinado por el tamiz de menor abertura, por el cual el 100% del agregado pasa.
- Tamaño máximo nominal, designado como el tamiz de mayor abertura que retiene no más de un 10% de las partículas más gruesas (UNITEC, 2023).

3.3.1.2 *Diseño de mezcla de concreto asfáltico para elaboración de especímenes de prueba*

Al completar la tabulación de datos de la Tabla 6 y Tabla 7, así como también establecer el tamaño máximo nominal del agregado a utilizar para la mezcla de concreto asfáltico, se procede a definir los porcentajes ideales de los agregados de la mezcla, por medio de un procedimiento iterativo que sigue los siguientes pasos.

1. Tabular los tamices a utilizar por medio de las indicaciones en la Tabla 5 y los datos requeridos en la Tabla 8 por medio de los datos en la Tabla 6 y Tabla 7.

Tabla 8. Datos de granulometría para el diseño de mezcla de concreto asfáltico

Tamiz	Tamaño del tamiz mm	Granulometría gruesa %Pase	Granulometría fina %Pase

Fuente: (UNITEC, 2023).

2. Tabular en la Tabla 9, el límite superior e inferior de % de pase según el tamaño máximo de los agregados, establecidos por la norma ASTM D 3515, encontrados en la Tabla 5. Los porcentajes de pase del filler son definidos por la normativa.

Tabla 9. Límite superior e inferior de porcentaje de pase

Tamiz	Tamaño del tamiz mm	Límite superior %Pase	Límite inferior %Pase	Filler %Pase
				100
				100
				100
				100
				100
				100
				75

Fuente: (UNITEC, 2023).

- Como siguiente paso, se deben definir los % de pase ideales para el agregado grueso y fino, donde la sumatoria de ambos debe ser igual a 100%. Así mismo, se debe definir el porcentaje de pase de filler en un rango de 2 a 5%. Para definir estos porcentajes, se deben graficar los límites superiores e inferiores de % de pase obtenidos en la Tabla 9 en el eje y, y el diámetro de los tamices en milímetros en el eje x, como se demuestra de ejemplo en la siguiente ilustración:

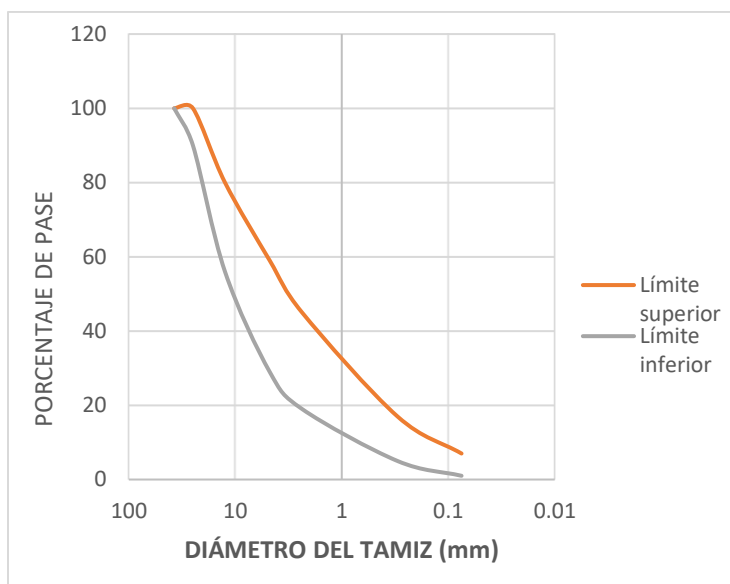


Ilustración 30. Ejemplo de gráfica de límite superior e inferior de porcentaje de pase

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

El porcentaje ideal de los agregados se define utilizando la Tabla 10, donde de forma iterativa, se debe de tabular porcentajes propuestos para cada agregado. Los porcentajes por utilizar serán

los que, al graficar la suma de los porcentajes de pase del agregado grueso y fino, y filler, se encuentren dentro de los límites estipulados en la Tabla 9, así como se observa en la Ilustración 31.

Tabla 10. Ejemplo de tabla de porcentajes ideales de los agregados

% Ideales de agregados					Gráfica
Tamiz	Tamaño del Tamiz mm	Gruesa %	Fina %	Filler (2 a 5) %	Fina + Gruesa %Pase

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

3.3.1.2.1 Ecuaciones programadas en Excel en la Tabla 10

Los datos de porcentaje de pase de los agregados de los tamices se definen utilizando los datos correspondientes para cada tamiz, con las siguientes ecuaciones:

$$\%Gruesa = \%pase\ de\ granulometría\ gruesa \times \frac{\left(\%idealGruesa - \frac{\%idealGruesa \times \%filler}{100}\right)}{100}$$

Ecuación 10. % de pase grueso ideal propuesto

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

$$\%Fina = \%pase\ de\ granulometría\ fina \times \frac{\left(\%idealFina - \frac{\%idealFina \times \%filler}{100}\right)}{100}$$

Ecuación 11. % de pase fino ideal propuesto

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

$$\%Filler = \frac{\% de pase de filler \times \%filler propuesto}{100}$$

Ecuación 12. % de filler ideal propuesto

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

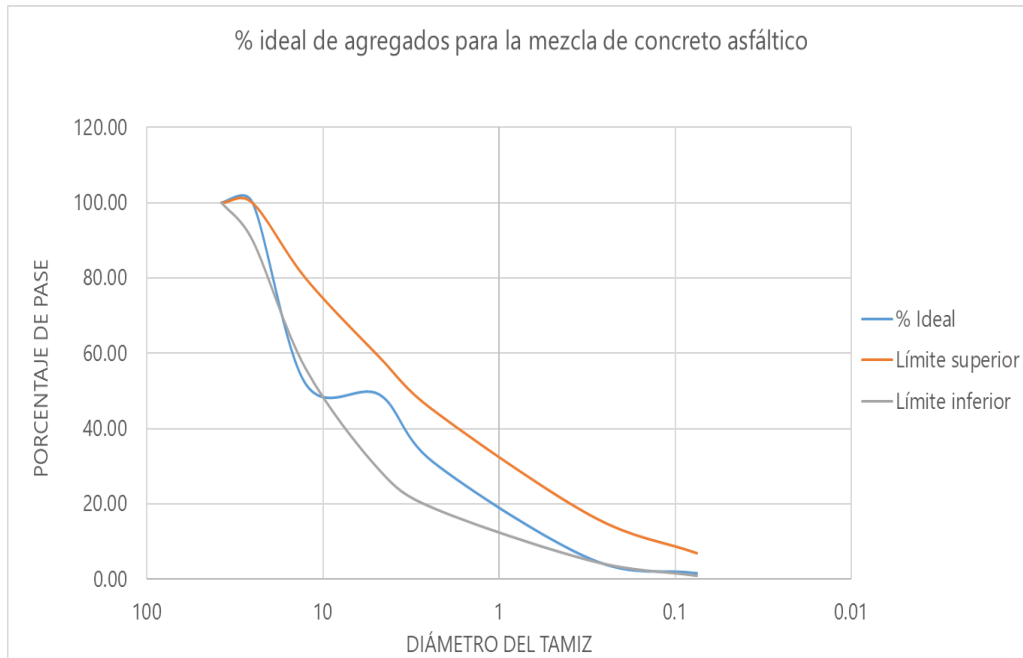


Ilustración 31. Ejemplo de gráfico de %pase ideal de los agregados

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

4. Como último paso se debe calcular los pesos en gramos para cada material utilizado en los especímenes a elaborar, los cuales tendrán un peso total de 1000-1200 gramos. Las cantidades de los materiales deben ser determinados para los porcentajes de asfalto estipulados por la normativa, los cuales son: 4%, 5%, 6%, 7%, y 8% (UNITEC, 2023).

Para determinar estos datos se debe utilizar la siguiente tabla:

Tabla 11. Ejemplo de tabla de los pesos requeridos de cada material para las mezclas

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (g)
Asfalto	4%,5%,6%,7%,8%		
Grava			
Arena			
Filler			
Total			

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

3.3.1.2.2 Ecuaciones programadas en Excel en la Tabla 11

Los datos de la tabla son calculados utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\% \text{ Por peso de filler} = \% \text{ Filler propuesto}$$

Ecuación 13. Porcentaje por peso del filler

Fuente: (UNITEC, 2023).

$$\% \text{ Por peso del material} = \% \text{ ideal}_{\text{agregado}} \times \left(\frac{100 - \% \text{ Filler propuesto}}{100} \right)$$

Ecuación 14. Porcentaje por peso de cada material

Fuente: (UNITEC, 2023).

$$\% \text{ Por peso de mezcla}_{\text{material}} = \frac{\% \text{ Por peso del agregado}}{\text{Total } \% \text{ por peso de los materiales}} \times 100$$

Ecuación 15. Porcentaje por peso de mezcla de cada material

Fuente: (UNITEC, 2023).

$$\text{Peso por material}_{\text{gramos}} = \frac{\text{Masa probeta} \times \% \text{ Por peso de mezcla}_{\text{agregado}}}{100}$$

Ecuación 16. Peso para cada material

Fuente: (UNITEC, 2023).

El contenido total del filler requerido para cada mezcla consiste en 25% retenido de tamiz 200 y 75% de pase 200.

3.3.1.3 *Peso específico de los agregados*

“Este método cubre la determinación del promedio de densidad de una cantidad de partículas de agregado fino y grueso, la densidad relativa, y la absorción de los agregados finos y gruesos” (ASTM, 2017).

Al haber realizado el ensayo de peso específico y absorción en el laboratorio, se habrá registrado los datos especificados por la normativa para poder proceder con los cálculos indicados a continuación.

3.3.1.3.1 *Peso específico del agregado fino*

El peso específico Bulk del agregado fino se calcula utilizando la Ecuación 17, donde A es el peso al aire de la muestra seca al horno en gramos, B es el peso del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración en gramos, y C es el peso del picnómetro con la muestra y el agua, en gramos.

$$\text{Peso específico Bulk}_{\text{fino}} = \frac{A}{B + 500 - C}$$

Ecuación 17. Peso específico Bulk del agregado fino

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico Bulk saturado del agregado fino se calcula utilizando la Ecuación 18.

$$\text{Peso específico Bulk saturado}_{\text{fino}} = \frac{500}{B + 500 - C}$$

Ecuación 18. Peso específico Bulk saturado con superficie seca del agregado fino

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico aparente se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Peso específico aparente}_{\text{fino}} = \frac{A}{B + A - C}$$

Ecuación 19. Peso específico aparente del agregado fino

Fuente: (UNITEC, 2023).

Por último, se calcula el porcentaje de absorción por medio de la Ecuación 20.

$$\%Absorción_{fino} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

Ecuación 20. Porcentaje de absorción del agregado fino

Fuente: (UNITEC, 2023).

3.3.1.3.2 Peso específico del agregado grueso

El procedimiento de cálculos del peso específico para el agregado grueso es similar para el fino, sin embargo, existen variaciones en las ecuaciones debido a que es un material de diferentes propiedades y características.

Como primer paso se debe calcular el peso de la muestra saturada en agua con la Ecuación 21, donde C es el peso de la muestra saturada en agua, P_{am} es el peso del picnómetro con agua más material, y P_a es el peso del picnómetro más agua,

$$C = P_{am} - P_a$$

Ecuación 21. Peso de la muestra de agregado grueso saturada en agua

El peso específico se calcula por medio de la Ecuación 22, donde A es el peso de la muestra seca al horno en gramos y B es el peso en gramos de la muestra saturada con superficie seca.

$$Peso\ específico\ Bulk_{grueso} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 22. Peso específico Bulk del agregado grueso

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico Bulk saturado del agregado grueso se calcula utilizando la Ecuación 24.

$$Peso\ específico\ Bulk\ saturado_{grueso} = \frac{B}{B - C}$$

Ecuación 23. Peso específico Bulk saturado con superficie seca del agregado grueso

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico aparente del agregado grueso se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Peso específico aparente}_{grueso} = \frac{A}{A - C}$$

Ecuación 24. Peso específico aparente del agregado grueso

Fuente: (UNITEC, 2023).

Por último, se calcula el porcentaje de absorción por medio de la Ecuación 24.

$$\%Absorción_{grueso} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Ecuación 25. Porcentaje de absorción del agregado grueso

3.3.1.4 Preparación de los especímenes de prueba

UNITEC (2023) menciona:

Para poder determinar el contenido óptimo de asfalto para una gradación de agregados de una mezcla asfáltica por el Método Marshall, se deben preparar una serie de especímenes de prueba con un rango de contenidos de asfalto diferentes para que las curvas de los datos de prueba muestren bien definido el valor óptimo. Se deberán preparar por lo menos 3 especímenes y preferiblemente 5 especímenes por cada contenido de asfalto usado, para así sacar el promedio de los valores obtenidos para contenido de asfalto usado.



Ilustración 32. Molde de probetas de concreto asfáltico

Fuente: (Solano & García, 2015)

El procedimiento de elaboración de los especímenes para el Método Marshall es el siguiente:



Fuente: (UNITEC, 2023)

3.3.1.5 Cálculos de gravedad específica de la mezcla suelta

Los cálculos de gravedad específica de la mezcla suelta se realizan haciendo uso de las siguientes ecuaciones:

La gravedad específica de las pastillas compactadas se obtiene por medio de la Ecuación 26, donde G_{mb} es la gravedad específica de las pastillas compactadas, W_s es el peso sumergido en gramos, y W_a es el peso al aire en gramos.

$$Gmb = \frac{Wa}{Wa - Ws} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

Ecuación 26. Gravedad específica de las pastillas compactadas

Fuente: (UNITEC, 2023).

La gravedad específica de la mezcla suelta se obtiene por medio de la Ecuación 27, donde Gmm es la gravedad específica de la mezcla suelta, Wm es el peso de material, W_{p+a} es el peso del picnómetro más agua, y W_{p+a+m} es el peso del picnómetro más agua más material.

$$Gmm = \frac{Wm}{W_{p+a} + Wm - W_{p+a+m}} = gr/cm^3$$

Ecuación 27. Gravedad específica de mezcla suelta

Fuente: (UNITEC, 2023).

Se utilizan los datos obtenidos en el ensayo de peso específico de los agregados y se utiliza un valor de 1.01 para el peso específico del cemento asfáltico. G1 es el peso específico de la grava, G2 es el peso específico de la arena, y G3 es el peso específico del filler el cual es 2.65 (UNITEC, 2023).

Por medio de la Tabla 11, se debe asignar las variables siguientes al porcentaje por peso de la mezcla para cada material. La siguiente tabla se deberá repetir 5 veces para cada % de asfalto.

Tabla 12. Ejemplo de asignación de variable a los % de pesos de los materiales

Material	% Por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	6%	$\frac{6}{106} * 100 = 5.66$	Pb
Grava	55.30%	$\frac{55.3}{106} * 100 = 52.17$	P1
Arena	36.80%	$\frac{36.8}{106} * 100 = 34.72$	P2
Filler	7.90%	$\frac{7.90}{106} * 100 = 7.45$	P3
Total	106%	100%	

Elaboración propia, Fuente: (UNITEC, 2023).

La sumatoria de los % por peso de la mezcla de la grava, arena, y filler se denomina como P_s , donde P_1 es el porcentaje por peso de la mezcla de la grava, P_2 es el porcentaje por peso de la mezcla de la arena, y P_3 es el porcentaje por peso de la mezcla del filler.

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3$$

Ecuación 28. Sumatoria por peso de la mezcla de los agregados áridos

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico Bulk (G_{sb}) del agregado total se obtiene por medio de la siguiente ecuación:

$$G_{sb} = \left[\frac{P_1 + P_2 + P_3}{\left(\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} \right)} \right]$$

Ecuación 29. Peso específico Bulk del agregado total

Fuente: (UNITEC, 2023).

El peso específico efectivo (G_{se}) de la mezcla suelta se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$G_{se} = \left[\frac{100 - P_b}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b} \right)} \right]$$

Ecuación 30. Peso específico efectivo de la mezcla suelta

Fuente: (UNITEC, 2023).

El asfalto absorbido por el agregado (P_{ba}) se obtiene de la siguiente forma:

$$P_{ba} = 100 * \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right] * G_b$$

Ecuación 31. Asfalto absorbido por el agregado

Fuente: (UNITEC, 2023).

El contenido efectivo de asfalto en la mezcla se obtiene con la siguiente ecuación, donde P_{be} es el contenido efectivo de asfalto en la mezcla:

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Ecuación 32. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla

Fuente: (UNITEC, 2023).

El porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA):

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Ecuación 33. Porcentaje de vacíos de agregado mineral

Fuente: (UNITEC, 2023).

El porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa), se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Ecuación 34. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada

Fuente: (UNITEC, 2023).

Se debe realizar una corrección a la estabilidad, por deformaciones en el espécimen. El factor de corrección es obtenido por medio de la Tabla 13, este valor depende del volumen y grosor del espécimen fabricado.

$$Estabilidad\ corregida = Estabilidad * factor\ de\ corrección$$

Ecuación 35. Corrección de la estabilidad

Fuente: (UNITEC, 2023).



Ilustración 33. Altura y diámetro por medir de las probetas realizadas

Tabla 13. Proporciones de correlación de estabilidad

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen,		Correlation Ratio
	in.	mm	
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 ¹ / ₁₆	27.0	5.00
226 to 237	1 ¹ / ₈	28.6	4.55
238 to 250	1 ³ / ₁₆	30.2	4.17
251 to 264	1 ¹ / ₄	31.8	3.85
265 to 276	1 ⁵ / ₁₆	33.3	3.57
277 to 289	1 ³ / ₈	34.9	3.33
290 to 301	1 ⁷ / ₁₆	36.5	3.03
302 to 316	1 ¹ / ₂	38.1	2.78
317 to 328	1 ⁹ / ₁₆	39.7	2.50
329 to 340	1 ⁵ / ₈	41.3	2.27
341 to 353	1 ¹¹ / ₁₆	42.9	2.08
354 to 367	1 ³ / ₄	44.4	1.92
368 to 379	1 ¹³ / ₁₆	46.0	1.79
380 to 392	1 ⁷ / ₈	47.6	1.67
393 to 405	1 ¹⁵ / ₁₆	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 ¹ / ₁₆	52.4	1.39
432 to 443	2 ¹ / ₈	54.0	1.32
444 to 456	2 ³ / ₁₆	55.6	1.25
457 to 470	2 ¹ / ₄	57.2	1.19
471 to 482	2 ⁵ / ₁₆	58.7	1.14
483 to 495	2 ³ / ₈	60.3	1.09
496 to 508	2 ⁷ / ₁₆	61.9	1.04
509 to 522	2 ¹ / ₂	63.5	1.00
523 to 535	2 ⁹ / ₁₆	65.1	0.96
536 to 546	2 ⁵ / ₈	66.7	0.93
547 to 559	2 ¹¹ / ₁₆	68.3	0.89
560 to 573	2 ³ / ₄	69.9	0.86
574 to 585	2 ¹³ / ₁₆	71.4	0.83
586 to 598	2 ⁷ / ₈	73.0	0.81
599 to 610	2 ¹⁵ / ₁₆	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

Fuente: (UNITEC, 2023).

3.3.1.6 *Elaboración de gráficas para obtener el contenido óptimo de asfalto*

Con los datos obtenidos anteriormente se elaboran 6 gráficas:

- Estabilidad corregida en libras-Contenido de asfalto
- Pa-%Contenido de asfalto.
- Gmb-%Contenido de asfalto.
- VMA-%Contenido de asfalto.
- Flujo-%Contenido de asfalto.
- Pbe-%Contenido de asfalto (UNITEC, 2023).

Según UNITEC (2023), el porcentaje óptimo de asfalto es obtenido tomando en cuenta las primeras tres gráficas: estabilidad, peso volumétrico y porcentaje de vacíos de aire. De la primera gráfica se obtiene el porcentaje de asfalto correspondiente a la estabilidad máxima. Se obtiene el porcentaje correspondiente al máximo peso volumétrico en la segunda gráfica. Por último, en la gráfica de porcentaje de vacíos de aire, se utiliza el valor de 4% de vacíos especificado por la normativa para obtener el porcentaje de asfalto. El porcentaje óptimo de asfalto será el promedio de los tres valores obtenidos utilizando las gráficas. Por último, se entra en las 6 gráficas con el porcentaje óptimo de asfalto y se verifica que los datos cumplan con las especificaciones.

Tabla 14. Criterios del Instituto del Asfalto para el diseño Marshall

Criterios para Mezcla del Metodo Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactacion, número de golpes en cada cara de la probeta	35		50		75	
Estabilidad, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacíos	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacíos en el Agregado Mineral (VMA)	<i>Ver Figura 3.20</i>					
Porcentaje de Vacíos llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

NOTAS

¹ Todos los criterios y no solo estabilidad, deben ser considerados al diseñar una mezcla asfáltica de pavimentación. Las mezclas asfálticas en caliente de base que no cumplan estos criterios, cuando se ensayen a 60°C, se consideraran satisfactorias si cumplen los criterios cuando se ensayen a 38°C, y si se colocan a 100 mm o más por debajo de la superficie. Esta recomendación se aplica solamente a las regiones que tengan una variedad de condiciones climáticas similar a la que prevalece en casi todas las regiones de Estados Unidos. En las regiones que tengan condiciones climáticas mas extremas puede ser necesario usar temperaturas mas bajas de ensayo.

² Clasificaciones del Transito

- Liviano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño < 104
- Mediano Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño entre 104 y 106
- Pesado Condiciones de transito que resultan en un EAL de diseño > 106

³ Los esfuerzos de compactación en el laboratorio deberán aproximarse a la densidad máxima obtenida en el pavimento bajo el transito.

⁴ Los valores de fluencia se refieren al punto en donde la carga comienza a disminuir.

⁵ Cuando se este calculando el porcentaje de vacíos, deberá permitirse cierta tolerancia en la porción de cemento asfáltico perdida por absorción en las partículas de agregado.

⁶ El porcentaje de vacíos en el agregado mineral debe ser calculado con base en el peso específico total ASTM del agregado.

Fuente: (UNITEC, 2023).

3.3.2 ELABORACIÓN EN PLANTA DEL CONCRETO ASFÁLTICO

UNAM (2006) afirma que la elaboración del concreto asfáltico se realiza por medio de una planta de asfalto, la cual combina los agregados luego de ser calentados y secados, para luego mezclarlos con cemento asfáltico. De este modo, producir una mezcla de concreto asfáltico

diseñada para cumplir especificaciones establecidas. Menciona que la calidad de mezcla producida depende totalmente del diseño de dosificación y la calidad de los materiales utilizados.

Existen dos tipos de plantas de asfalto utilizadas para elaboración de concreto asfáltico: planta de dosificación y planta mezcladora de tambor. Estas plantas comparten ciertas operaciones, las cuales incluyen:

- Almacenamiento y alimentación de agregado frío.
- Control y colección de polvo.
- Almacenamiento de mezcla.
- Pesaje y manejo (UNAM, 2006).

3.3.2.1 *Planta de dosificación*

UNAM (2006) comenta:

En una planta asfáltica de dosificación, los agregados son combinados, calentados y secados, proporcionados, y mezclados con el cemento asfáltico para producir una mezcla asfáltica en caliente. Una planta puede ser pequeña o grande, dependiendo del tipo y la cantidad de mezcla asfáltica que se esté produciendo. También puede ser estacionaria o portátil.

UNAM (2006) menciona que las operaciones que se conducen en este tipo de planta son:

- Almacenamiento y alimentación en frío del agregado.
- Secado y calentamiento del agregado.
- Cribado y almacenamiento del agregado caliente.
- Almacenamiento y calentamiento de asfalto.
- Medición y mezclado de asfalto y agregado.
- Carga de mezcla final en caliente

Catorce partes principales

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Tolva fría | 8. Unidad de cribado |
| 2. Compuerta de alimentación en frío | 9. Tolvas calientes |
| 3. Elevador de material en frío | 10. Caja pesadora |
| 4. Secador | 11. Unidad de mezclado - camasadero |
| 5. Colector de polvo | 12. Depósito de relleno mineral |
| 6. Chimenea de escape | 13. Depósito de cemento asfáltico caliente |
| 7. Elevador de material en caliente | 14. Caba de pesado de asfalto |

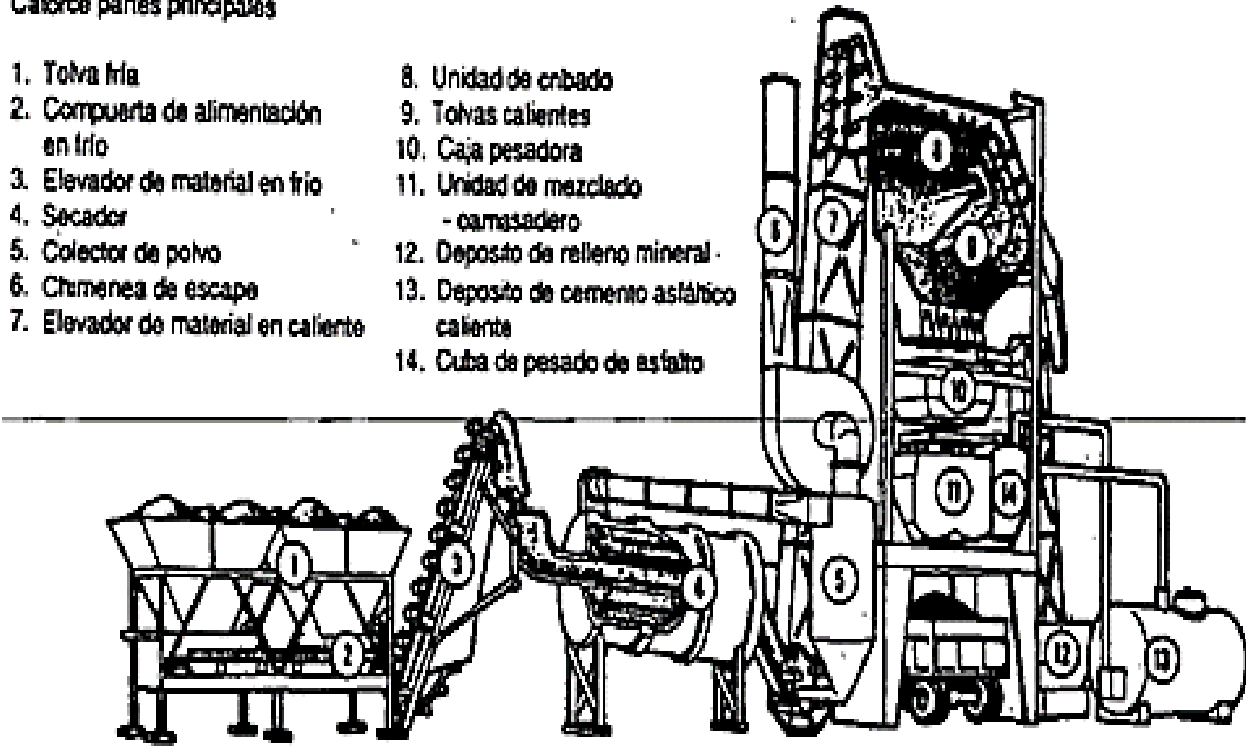


Ilustración 34. Vista en elevación de una planta de dosificación y sus partes.

Fuente: (UNAM, 2006).

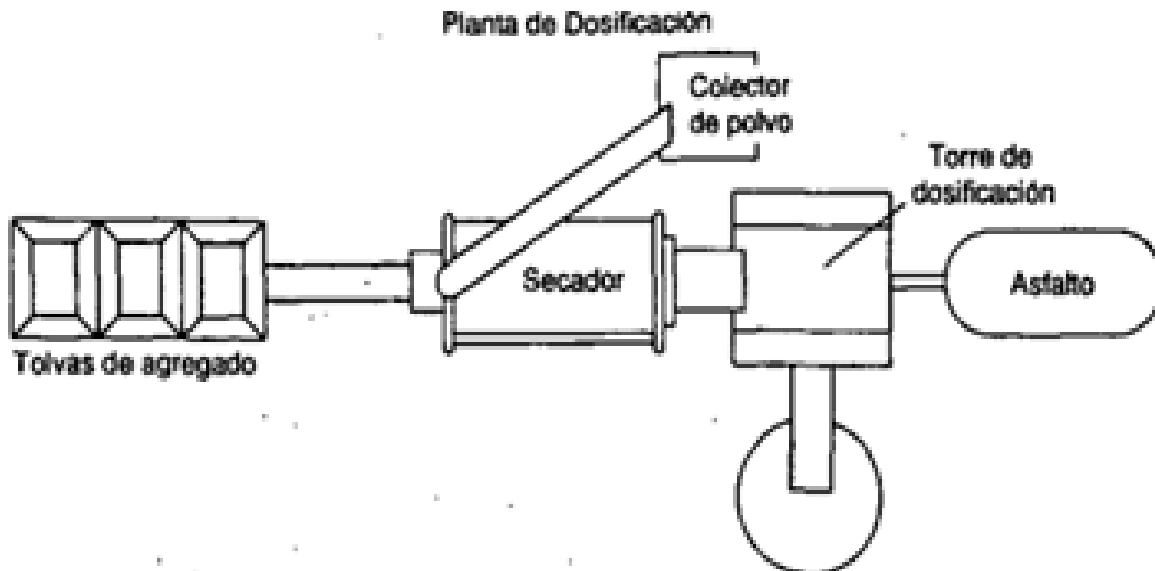


Ilustración 35. Vista en planta de una planta de dosificación y sus partes.

Fuente: (UNAM, 2006).

3.3.2.2 Planta mezcladora de tambor

“En una planta mezcladora de tambor no hay cribas de graduación, tolvas calientes, tolvas de pesaje o amasaderos. La graduación del agregado es controlada en el alimentador en frío” (UNAM, 2006).

En esta planta los agregados son mezclados totalmente con el cemento asfáltico por medio de la rotación realizado por el tambor, la cual provee una acción mezcladora que logra combinar los materiales para elaborar la mezcla de concreto asfáltico. Al ser descargada del tambor, la mezcla es transportada para posteriormente ser cargada en camiones (UNAM, 2006).

La planta mezcladora de tambor está compuesta por los siguientes componentes principales:

- Tolvas de agregado de alimentación en frío.
- Sistema de transporte y pesado de agregado.
- Mezclador de tambor.
- Sistema de colector de polvo.
- Transportador de mezcla en caliente.
- Silo de compensación para mezcla.
- Cabina de control.
- Tanque de almacenamiento de asfalto

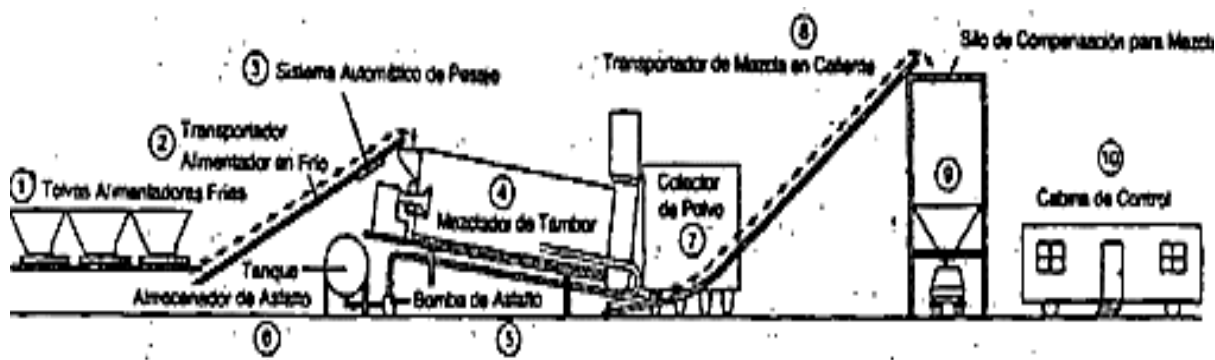


Ilustración 36. Planta mezcladora de tambor.

Fuente: (UNAM, 2006).

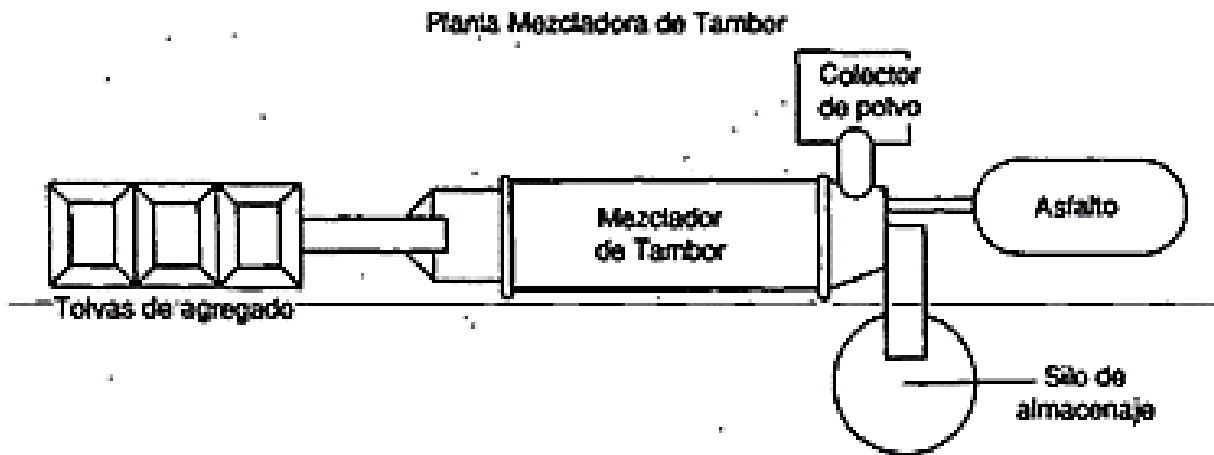


Ilustración 37. Vista en planta de una planta mezcladora de tambor y sus partes.

Fuente: (UNAM, 2006).

3.3.3 CONSERVACIÓN DEL PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO

“La conservación procura, evitar la destrucción de partes de la estructura de los caminos y la necesidad de una posterior rehabilitación o reconstrucción. Incluye actividades tales como el mantenimiento y el refuerzo de la superficie” (CEPAL, 1994).

El pavimento de concreto asfáltico predomina en la red vial nacional de Honduras como se refleja en la Ilustración 2. Este pavimento es accesible, debido a su diseño y procedimiento constructivo de baja complejidad. Sin embargo, es necesario realizar obras de conservación para su correcto desempeño a lo largo de su vida útil. Existen diferentes obras para que el pavimento de concreto asfáltico cumpla la vida útil de diseño y se prolonguen.

3.3.3.1 *Mantenimiento rutinario*

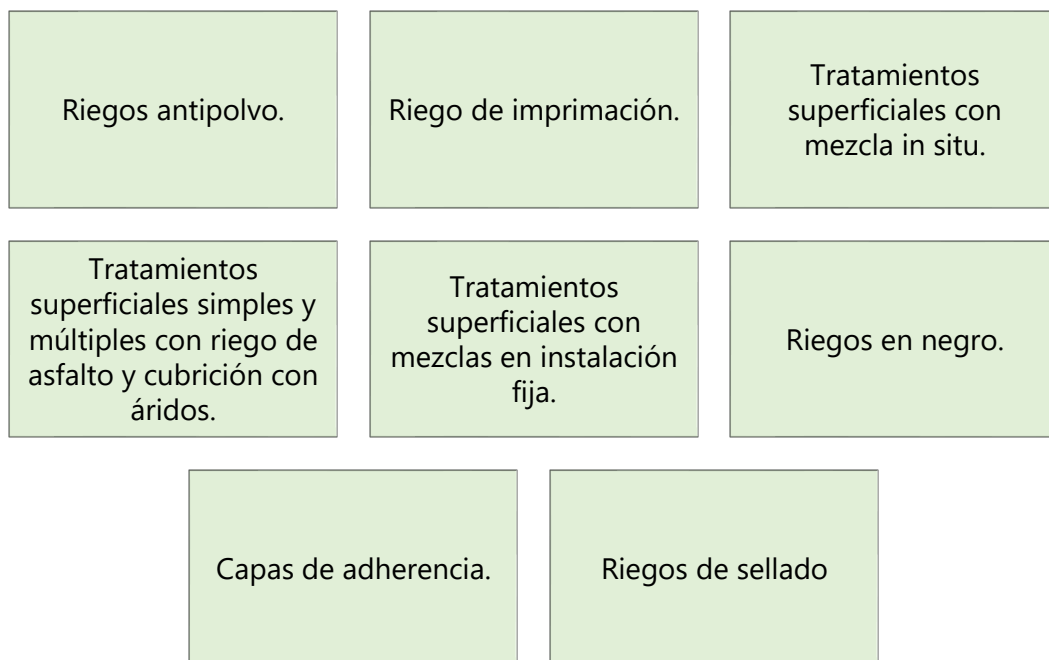
CEPAL (1994) menciona que los mantenimientos rutinarios son una combinación de acciones de contingencia realizados una o más veces al año. Los mantenimientos rutinarios consisten en: reparaciones localizadas de leves defectos en el pavimento, nivelación de superficies, mantenimiento de drenaje en todos los accesorios de la calle, limpieza de escombros y otros objetos que puedan afectar el pavimento y mantenimiento en zonas de descanso.

3.3.3.2 Tratamiento de la superficie

“Actividad por la cual se procura restablecer algunas características del pavimento, sin constituirse en un refuerzo estructural. Normalmente se aplica mientras el pavimento aún está en buen estado, no habiendo alcanzado a llegar ni siquiera al estado regular” (CEPAL, 1994, pág. 44).

The Asphalt Institute (1973) menciona que el tratamiento superficial es una capa impermeable la cual cubre el pavimento existente, con el propósito de aumentar la resistencia de desgaste producida por el tráfico. Por lo general, los espesores de los tratamientos no superan los 25 mm, ya que su propósito no es aumentar las propiedades resistentes de la carpeta asfáltica existente.

Los tratamientos superficiales es el término general para las aplicaciones de asfalto, con o sin áridos. Las obras de tratamiento que se aplican a las superficies de pavimento asfáltico son según (The Asphalt Institute, 1973):



3.3.3.3 *Renovación de la superficie*

“Los caminos pavimentados normalmente necesitan renovar su superficie cuando se encuentran en estado regular. El objetivo es preservar la calidad de rodadura, asegurar la integridad estructural del camino por tiempo más prolongado y evitar su destrucción (CEPAL, 1994, pág. 45).

3.3.3.4 *Refuerzo de la superficie*

“Actividad similar a la renovación de la superficie, pero cuyo objetivo específico consiste en aumentar la resistencia estructural del pavimento” (CEPAL, 1994, pág. 45).

3.3.3.5 *Rehabilitación*

CEPAL (1994) afirma:

Reparación selectiva y de refuerzo del pavimento o de la calzada, previa demolición parcial de la estructura existente. La rehabilitación se efectúa cuando el camino se encuentra demasiado deteriorado como para poder resistir una mayor cantidad de tránsito en el futuro, pudiendo incluir, además, algunos mejoramientos del drenaje. La rehabilitación tiene el objetivo de restablecer la capacidad estructural y la calidad de rodadura.

3.3.3.6 *Reconstrucción*

Renovación completa de la estructura del camino, previa demolición parcial o completa de la estructura existente, que generalmente se efectúa usando la explanación y el alineamiento regulares del camino. El objetivo de esta actividad es remediar las consecuencias provocadas por el descuido prolongado, y se realiza cuando la rehabilitación ya no es posible. La reconstrucción puede tener dos causas: una deficiente construcción, o bien, la ausencia de un esquema sano de conservación. (CEPAL, 1994, pág. 46)

3.3.3.7 *Mejoramiento*

Estas son mejoras en la calzada del pavimento relacionadas con el alineamiento, curvatura, pendiente, y el ancho. Su objetivo es aumentar la capacidad del pavimento, velocidad y seguridad de los usuarios que la transitan. Estos trabajos no son considerados obras de conservación, como su nombre lo dice, estos trabajos solamente se realizan si se pretende mejorar el rendimiento y el diseño de un camino (CEPAL, 1994).

3.3.3.8 *Reparación de emergencia*

“Arreglos que se ejecutan cuando el camino está intransitable, como consecuencia del descuido prolongado o de un desastre natural. Normalmente no se remedian las fallas estructurales, pero se hace posible el flujo vehicular durante un tiempo limitado” (CEPAL, 1994, pág. 46).

3.4 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

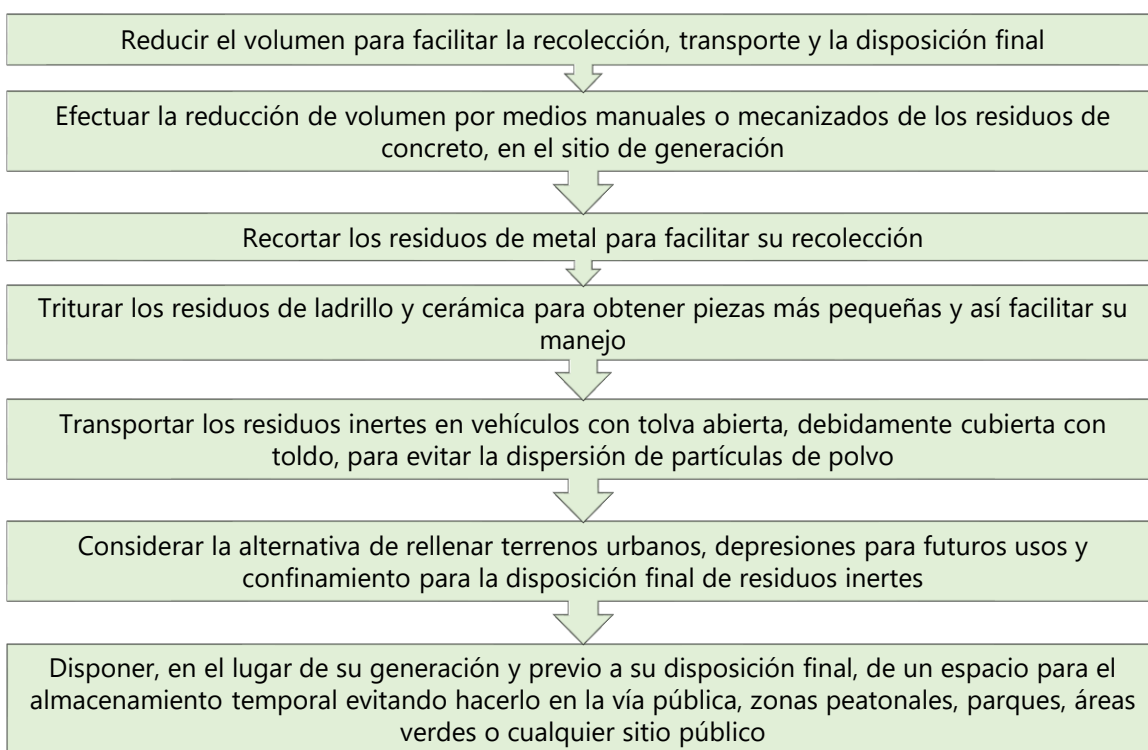
Se pretende realizar la mezcla de concreto asfáltico reciclado por medio de una normativa la cual no es requerida ni usualmente utilizada para el diseño de pavimentos en el país. Conocer el procedimiento detallado para la elaboración, garantiza que las mezclas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil cumplan con las especificaciones estipuladas por la normativa

3.4.1 LEYES Y NORMATIVAS DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN EN HONDURAS

El Reglamento para el manejo integral de los residuos sólidos clasifica los residuos según su manejo y origen. Los residuos se pueden categorizar como especiales, no especiales e inertes. Los residuos sólidos provenientes de la construcción y demolición son categorizados como residuos sólidos inertes (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2010).

La Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (2010) establece en el Reglamento para el manejo integral de los residuos sólidos: "Artículo 72.- Los residuos sólidos generados en obras de construcción y urbanizaciones deberán depositarse en lugares asignados por la Municipalidad" (pág.13).

El artículo 73 del Reglamento para el manejo integral de los residuos sólidos menciona que, para facilitar el manejo y disposición final de los residuos, se deben seguir, las siguientes alternativas:



3.4.1.1 *Infracciones establecidas sobre el manejo de residuos sólidos inertes.*

La Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (2010) establece como una infracción leve, dejar en la vía pública, los residuos inertes de construcción; la cual se sanciona con una multa mínima de cinco mil lempiras (L 5,000.00). Establecer botaderos clandestinos, impedir o dificultar

por más de una vez las inspecciones de los funcionarios, y carecer de sistemas de almacenamiento y recolección de residuos sólidos de acuerdo con las normas establecidas en el reglamento, son faltas graves. Las infracciones graves se sancionan con una multa mínima de cien mil lempiras (L 100,000.00).

3.4.2 NORMATIVAS UTILIZADAS EN ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA PARA EL RECICLAJE DEL RESIDUO DE CONCRETO ASFÁLTICO

El departamento de transporte de los Estados Unidos de América (2011) menciona que para realizar el diseño de una mezcla con concreto asfáltico reciclado se utiliza la norma AASHTO M323 y AASHTO R 35. Estas dos normas son utilizadas para realizar diseños de mezclas con materiales vírgenes, pero cuando se utiliza el residuo de concreto asfáltico, este se toma como un agregado adicional por lo que, el diseño se realiza de una manera similar, por ende, se utilizan las mismas normas.

3.4.2.1 Norma AASHTO M323

Esta norma se utiliza en el diseño volumétrico de mezclas asfálticas Superpave (superior performing asphalt pavements), esta utiliza las propiedades de los agregados y mezclas, para producir fórmulas para mezclas de asfalto. Dentro de esta norma se puede encontrar los requisitos mínimos de calidad para el ligante, agregados y mezclas asfálticas para poder realizar un diseño volumétrico de mezclas Superpave (AASHTO , 2017).

La norma AASHTO M 323 menciona que el ligante deberá tener una clasificación de desempeño, la cual es (PG). Esta debe de cumplir con los requisitos de M 320, y tiene que ser

apropiado para el clima y las condiciones de carga de tránsito que se dan en el sitio del proyecto a realizar o según a lo especificado en los documentos del contrato (AASHTO , 2017).

AASHTO (2017) afirma: "si se va a utilizar RAP en la mezcla, este puede especificarse de acuerdo con el porcentaje de peso seco (masa) de la mezcla o por la proporción de ligante del pavimento asfáltico del RAP en el ligante total" (p. 4).

En caso de que se decida ajustar la cantidad de concreto asfáltico reciclado por un porcentaje en peso seco de la mezcla, el grado de ligante seleccionado tendrá que ser ajustado utilizando una tabla, de esta manera se tendrá en cuenta la cantidad y la rigidez del ligante (AASHTO , 2017).

La tabla que se utiliza se muestra a continuación:

Tabla 15. Selección de ligante según porcentaje de concreto asfáltico reciclado

Grado de ligante asfáltico virgen recomendado	Porcentaje de RAP
Sin cambios en la selección de ligante	< 15
Seleccione un ligante virgen un grado más bajo del normal (por ejemplo, seleccione un PG 58-28 si normalmente se usa un PG 64-22)	15 a 20
Siga las recomendaciones del Apéndice XI	> 25

Fuente: (AASHTO , 2017)

3.4.2.2 Norma AASHTO R35

Esta norma consiste en la práctica estándar para la evaluación del diseño de la mezcla, utilizando las propiedades de los agregados y la mezcla para producir una fórmula de mezcla de trabajo para una mezcla asfáltica en caliente. El diseño de la mezcla está basado en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica en términos de vacíos de aire, vacíos en el

agregado mineral y vacíos llenos de asfalto. Esta norma también se utiliza para proporcionar una selección preliminar de parámetros de mezcla como un inicio para análisis de mezclas y análisis de predicción de rendimiento, que principalmente utilizan T 320 y T 322 (AASHTO , 2017).

Para seleccionar los materiales, el asfalto, agregados y el concreto asfáltico reciclado, tienen que cumplir con los requisitos ambientales y de tráfico para el proyecto en el cual se está diseñando la mezcla asfáltica. Se debe de determinar la gravedad específica de todos los agregados propuestos para la mezcla, esto incluye el concreto asfáltico reciclado y también se debe de determinar la gravedad específica de ligante asfáltico a utilizar (AASHTO , 2017).

Esta norma en el apéndice contiene una sección que son consideraciones y prácticas de diseño de mezclas especiales para mezclas de asfalto en caliente WMA. Estas mezclas tienen una temperatura menor que las mezclas asfálticas calientes normales, HMA, porque la temperatura aproximada a la que se produce es a una temperatura de 28 grados centígrados. Lo que se quiere lograr es que las mezclas WMA tengan resultados similares en fuerza, durabilidad y características de rendimiento, a las mezclas HMA (AASHTO , 2017).

El concreto asfáltico reciclado también se puede utilizar en estas mezclas de WMA. Para seleccionar el concreto asfáltico reciclado a utilizar se tiene que hacer mediante la norma M 323. Al momento de utilizar concreto asfáltico reciclado en WMA se tiene que tomar en cuenta la temperatura de compactación en campo, ya que la temperatura de compactación en campo deberá ser mayor que el grado de temperatura del aglomerante del concreto asfáltico reciclado (AASHTO , 2017).

3.4.3 IMPLEMENTACIÓN EN CONSTRUCCIÓN DEL RESIDUO DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

Además de utilizarse en carpetas asfálticas, el residuo también es utilizado en bases y subbases.

3.4.3.1 *Bases y subbases*

Una de las aplicaciones que se le da al residuo de concreto asfáltico reciclado, es que se utiliza en bases y subbases, esto incluye carreteras pavimentadas y sin pavimentar, estacionamientos, caminos para bicicletas, rehabilitación de calles de grava, hombros y accesos a viviendas (U.S. Department of Transportation , 2016).

El Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América (2016) menciona que el residuo de concreto asfáltico utilizado en bases y subbases, tuvo un rendimiento satisfactorio. Algunas de las ventajas que el residuo asfáltico proporciona en esta aplicación son, buen drenaje, una durabilidad larga y una capacidad de carga adecuada. Cabe destacar que esto solo se puede conseguir si se sigue el procedimiento correcto, ya que un residuo de concreto asfáltico que no está bien procesado o mezclado, tendrá un rendimiento bajo. Otro punto para considerar es que, si se aumenta el residuo de concreto asfáltico en las mezclas, esto puede resultar contraproducente, porque la capacidad de carga de la base en vez de aumentar disminuiría.

El uso del concreto asfáltico reciclado en mezclas para bases ha demostrado tener resultados satisfactorios por más de 20 años y en ciertas áreas de los Estados Unidos de América se considera una práctica estándar. Algunos de los estados que han empleado esta práctica de utilizar concreto asfáltico reciclado para base son, Arizona, Illinois, Louisiana, Nebraska, Dakota del Norte, Oregon, Texas, entre otros. Hay estados como Alaska, Nueva York, Ohio y Utah que han utilizado esta práctica para emplearla en la subbase (Recycled Materials Resource Center, 2023).

3.4.3.2 *Mezclas en caliente*

Hay dos métodos que se pueden utilizar para realizar mezclas en caliente con concreto asfáltico reciclado, el primer método, que es el más común, es un proceso donde el residuo de concreto asfáltico se mezcla en una planta con agregados y cemento asfáltico totalmente nuevos, y de esta manera se genera la nueva mezcla. El segundo método consiste en corregir el desgaste de la capa asfáltica. Esto se logra aplicando calor a la superficie para que esta se suavice, luego se quita la superficie del pavimento mecánicamente, una vez que se haya quitado, se mezcla con aditivos, puede ser un aditivo para reciclaje o un aditivo rejuvenecedor, en algunos casos se le agrega asfalto nuevo y/o agregados. Por último, se reemplaza la capa sin remover el material reciclado del sitio (U.S. Department of Transportation , 2016).

El departamento de transporte de los Estados Unidos de América (2016) afirma que la mezcla en caliente con concreto asfáltico reciclado es una de las prácticas más comunes en el área de reciclaje de asfalto. Este método de mezclas en caliente con concreto asfáltico reciclado ha sido estudiado a profundidad, y estos estudios indican que este tipo de mezclas es equivalente a las mezclas que se realizan con materiales vírgenes, porque el rendimiento que tienen es de la misma calidad. Estas mezclas tienen una ventaja sobre las mezclas con materiales vírgenes, generalmente las mezclas con concreto asfáltico reciclado suelen tener una vida útil mayor ya que envejecen de manera lenta, y también se muestran más resistentes al agua.

3.4.3.3 *Mezclas en Frio*

El concreto asfáltico reciclado no solamente se utiliza en mezclas en caliente, también se puede utilizar en mezclas en frío. Se utiliza como un agregado en la mezcla en frío, y se puede utilizar de dos formas. En el primer método el concreto asfáltico reciclado se mezcla con una

nueva emulsión de asfalto, y se le agrega un aditivo rejuvenecedor o un aditivo de reciclaje, al igual que se le añade agregados nuevos. Se mezcla en una planta y se genera la mezcla en frío. El método que se utiliza comúnmente es el segundo, que es un método que se realiza en sitio. Sin calor el concreto asfáltico reciclado se mezcla con una emulsión asfáltica y/o un aditivo de reciclaje o rejuvenecedor, también se le añade agregados vírgenes. Se mezcla en sitio, y se puede mezclar a una profundidad parcial o total, de esta manera se genera la mezcla (U.S. Department of Transportation , 2016).

Para las mezclas en frío no hay documentos disponibles que hablen acerca del rendimiento de esta mezcla. En 1994 se realizó una encuesta en los Estados Unidos de América, a las agencias de transporte estatales. Los resultados de dicha encuesta mostraron que al menos 32 estados han hecho o hacen uso de mezclas asfálticas en frío, cabe destacar que, aunque estos estados contestaron que, si utilizan este tipo de mezcla, la información sobre esta no está disponible. Como se mencionó anteriormente el método que comúnmente se utiliza es el segundo, pero se utiliza especialmente en calles donde no se tiene un tráfico alto (U.S. Department of Transportation , 2016).

3.4.4 NORMATIVAS PARA LA CALIFICACIÓN DEL RESIDUO DE CONCRETO ASFÁLTICO

Para poder realizar un diseño de mezcla, el primer paso es conocer algunas de las propiedades del residuo de concreto asfáltico. Son dos propiedades que se le tiene que conocer al residuo de concreto asfáltico, uno de ellos es la gradación del material recuperado y el segundo es el contenido de asfalto que contiene el material recuperado (U.S. Department of Transportation , 2016).

3.4.4.1 *Gradación del material recuperado*

El departamento de transporte de los Estados Unidos de América (2016) afirma que el agregado que se encuentra en el material recuperado, de una forma es más fino que el agregado virgen, esto se debe a una degradación que ocurre durante el proceso de la remoción del concreto asfáltico. Los requerimientos que debe de cumplir son, la norma ASTM D692 y la norma ASTM D1073.

Especificación estándar para agregado grueso para mezclas bituminosas de pavimentación, es el nombre de la norma ASTM D692. Los agregados gruesos que esta norma cubre son la piedra triturada, concreto hidráulico triturado, grava triturada y arcilla expandida triturada para poder ser usadas en mezclas bituminosas para pavimentación. Los agregados deben ser duros, resistentes y duraderos, y no deberán tener recubrimientos (ASTM, 2010).

Para las pruebas se tomarán muestras de los agregados, y se tienen que ajustar a ciertos requisitos físicos como, densidad aparente, características de pulido, solidez y comportamiento de degradación. El alcance de esta norma es encontrar si los materiales antes expuestos se pueden utilizar en mezclas asfálticas para pavimentación como se describe en las especificaciones D 3515 o D 4215. Una nota que aparece en la norma es que otros materiales que hayan demostrado un servicio satisfactorio se podrán utilizar (ASTM, 2010).

La norma ASTM D1073, es la especificación estándar para agregado fino para mezclas de pavimento asfáltico. El agregado tendrá que ser sometido a pruebas para ver si cumple con los requisitos prescritos, y para ello se deberá de realizar las pruebas de clasificación, módulo de finura y el índice de plasticidad. Esta norma pretende describir el material de una sola fuente, en caso de que se necesite mezclar materiales de dos o más fuentes, para poder cumplir con

especificaciones de la mezcla asfáltica, la tabla 1 que se encuentra en esta especificación no será aplicable. Hay una nota en esta norma, que menciona, que cuando se obtengan materiales de dos o más fuentes para la mezcla asfáltica, recomiendan que el encargado del diseño de la mezcla especifique las clasificaciones alternativas y las proporciones de mezcla de estos materiales que se suministrarán (ASTM, 2022).

3.4.4.2 Contenido de asfalto en el concreto asfáltico reciclado

Para poder conocer el contenido de asfalto en las muestras de concreto asfáltico reciclado, se utiliza la norma ASTM D2172, que es, métodos de prueba estándar para la extracción cuantitativa de ligante asfáltico de mezclas asfálticas. Todos los métodos de prueba que se encuentran en esta norma se pueden utilizar para determinar cuantitativamente el ligante asfáltico que se encuentra en mezclas asfálticas y en muestras de pavimento, para la aceptación de especificaciones, evaluación del servicio, control e investigación. Cada método expuesto en esta norma prescribe el solvente o solventes y otros aditivos que pueda utilizarse en los métodos a utilizar (ASTM, 2018).

Como se detalló anteriormente, hay distintos métodos que se pueden desarrollar para conocer el contenido de asfalto en el concreto asfáltico reciclado, pero el que se detallará a continuación, es el método de prueba A, que es con una máquina centrífuga para la extracción de asfalto.

Los aparatos que se necesitan para el método son los siguientes:

Horno	<ul style="list-style-type: none"> •Se necesita un horno que sea capaz de mantener la temperatura a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$
Bandeja	<ul style="list-style-type: none"> •La bandeja tiene que ser al menos de 300 milímetros de largo, 200 milímetros de ancho y 25 milímetros de profundidad
Balanza	<ul style="list-style-type: none"> •El tipo de balanza que se necesita debe tener al menos el 0.01% de precisión de la muestra
Plancha	<ul style="list-style-type: none"> •Se necesita una plancha eléctrica de 700 vatios continuos o con opciones de calor bajo, medio y alto
Envase graduado de boca pequeña	<ul style="list-style-type: none"> •La capacidad deberá ser de 1,000 o 2,000 mililitros
Plato de encendido	<ul style="list-style-type: none"> •Capacidad de 125 mililitros
Desecador	
Balanza analítica	

Fuente: (ASTM)

En este método se utilizan 4 reactivos los cuales se enlistan a continuación:

Solución de carbonato de amonio
Cloruro de metileno
Bromuro de propilo normal
Tricloroetileno

Fuente: (ASTM)

Cabe destacar que, en todas las pruebas, al menos que se indique lo contrario, se utilizará los productos químicos de grado reactivo. Se pretende que los reactivos que se vayan a utilizar

cumplan con las especificaciones, dichas especificaciones las brinda el comité de reactivos analíticos de la sociedad química americana (ASTM).

La ASTM (2023) menciona: "los solventes listados en la sección 6 solo deben de utilizarse bajo un capó o con un sistema efectivo de escape de superficie en un área bien ventilada, ya que a varios grados se vuelven tóxicos".

Para la toma de las muestras se realizan los siguientes pasos:

- Se obtienen las muestras acorde a la práctica D979
- Se preparan las muestras de prueba de la siguiente manera:
 - En caso de que la mezcla no esté lo suficientemente suave para poder separarla con una espátula, se tendrá que colocar en una bandeja y se calentará a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta que la mezcla pueda ser manipulada o mezclada. Luego se divide hasta que se obtenga la masa requerida del material.
 - El tamaño de la muestra dependerá del tamaño nominal del agregado máximo de la mezcla, siguiendo lo establecido por la tabla 1:

Tabla 16. Tamaño de la muestra

Nominal Maximum Aggregate Size Standard, mm	Sieve Size	Minimum Mass of Sample, kg
4.75	(No. 4)	0.5
9.5	$\frac{3}{8}$ in.	1
12.5	$\frac{1}{2}$ in.	1.5
19.0	$\frac{3}{4}$ in.	2
25.0	1 in.	3
37.5	$1\frac{1}{2}$ in.	4

Fuente: (ASTM)

- Adicionalmente se requerirá una muestra para poder determinar el contenido de humedad en la mezcla, esta muestra se toma inmediatamente después de haber obtenido la muestra para la prueba de extracción (ASTM, 2023).

Para el contenido de humedad, el proceso a seguir será acorde a lo descrito en el método D1461. Se calcula la masa del agua, W_2 , en la muestra obtenida, se multiplica el porcentaje de masa de agua, por la masa de la muestra extraída, W_1 (ASTM, 2023).



Ilustración 38. Máquina centrífuga para extracción de asfalto

Fuente: (H.W.Kessel, 2023)

En el método de prueba A se necesitan aparatos adicionales a los ya antes mencionados, que solo son necesarios en este método, los cuales son:

- Aparato de extracción: consiste en un tazón y un aparato donde el tazón podrá girar a una velocidad controlada variable de hasta 3,600 revoluciones por minuto. El aparato deberá tener un recipiente para que pueda recoger el disolvente que está siendo arrojado del tazón, al igual que un desagüe para drenar el disolvente.
- Anillos de filtro: de fieltro o papel, para encajar el borde del tazón



Ilustración 39. Anillos de filtro para máquina centrífuga

Fuente: (Gilson Company, INC., 2023)

- Papel de filtro con contenido bajo de ceniza: se puede usar este papel de filtro en vez de los anillos de filtro, deberán tener un grosor aproximado de 1.3 milímetros y el contenido de ceniza no deberá exceder el 0.2% (ASTM, 2023).

A continuación, se detalla el procedimiento a seguir para la extracción de asfalto:

Como primer paso se tiene que determinar el contenido de humedad, acorde a lo mencionado anteriormente

Se coloca de 650 a 2,500 gramos de muestra en un tazón

Se cubre la muestra con tricloroetileno, bromuro de propilo normal o cloruro de metileno, y se deja por una hora máximo para que el solvente desintegre la muestra. Se coloca el tazón que contiene la muestra y el solvente en la máquina centrífuga. Luego se determina la masa el anillo de filtro y se coloca alrededor del tazón. Se coloca un vaso de precipitados para que recolecte el extracto.

Se enciende la centrífuga se incrementa la velocidad hasta llegar a 3,600 revoluciones por minuto o hasta que el solvente pare de fluir del desagüe. Se detiene la máquina y se agregan 200 ml. de tricloroetileno, bromuro de propilo normal o cloruro de metileno y se repite el procedimiento.

Se remueve el anillo de filtro del tazón y se deja secando al aire. Se retira todo el contenido del tazón y se coloca en una bandeja, se seca en un baño de vapor, luego se seca la masa en el horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$. La masa del agregado extraído, W3, es igual a la masa del agregado en la bandeja más la masa que quedó retenida en el anillo de filtro.

Como siguiente paso se determina la cantidad de materia mineral en el extracto con el siguiente método: método centrífuga

Para este método se utiliza cualquier máquina centrífuga que sea de alta velocidad.

Se determina la masa de un tazón limpio y se coloca en la centrífuga. Se coloca un contenedor para recolectar el efluente de la máquina centrífuga. Se trasfiere el extracto a un contenedor apropiado y equipado con una válvula. El recipiente que contiene el extracto se deberá lavar varias veces con cantidades pequeñas de solvente limpio.

Se enciende la centrífuga y se deja que alcance una velocidad constante. Se abre la línea de alimentación y se coloca el extracto, a una velocidad de 100 a 150 mililitros por minuto. Cuando todo el extracto haya pasado a través de la centrífuga, se lava la línea de alimentación, sin apagar la centrífuga, con varios incrementos de solvente limpio, hasta que el efluente salga incoloro.

Se para la máquina centrífuga y se retira el tazón. Se deja que el residuo del solvente se evapore en un embudo y luego se seca en un contenedor en el horno. Se deja que el contenedor se enfríe y se determina la masa inmediatamente. El aumento en la masa es la masa de materia mineral, W4, en el extracto (ASTM, 2023).



Ilustración 40. Papel de filtro con contenido bajo de ceniza

Fuente: (Amazon , 2023)

Al haber finalizado con todo el procedimiento, como último paso, se determinará el porcentaje de asfalto en la muestra. El porcentaje de asfalto en la muestra se calculará con la siguiente ecuación:

$$\text{Contenido de asfalto \%} = \left[\frac{(W_1 - W_2) - (W_3 + W_4)}{W_1 - W_2} \right] * 100$$

Ecuación 36- Contenido de asfalto en la muestra de residuo de concreto asfáltico

Fuente: (ASTM, 2023)

Las variables son las siguientes:

W_1 : Masa de la muestra

W_2 : Masa de agua en la muestra

W_3 : Masa del agregado mineral extraído

W_4 : Masa de la materia mineral en el extracto

3.4.5 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO POR MEDIO DE LA NORMATIVA SELECCIONADA

El diseño de mezcla de concreto asfáltico reciclado seleccionada para recrear en el laboratorio de Ingeniería Civil es llamado "Hot Mix Asphalt Recycling", lo que se traduce a mezcla

en caliente de asfalto reciclado. El diseño es utilizado por la Administración Federal de Carreteras (Federal Highway Administration). El diseño utilizado por esta entidad es referenciado en la norma ASTM D3515 y el procedimiento del diseño incorpora ensayos normados por la ASTM, los cuales son: Método Marshall, el cual se rige por la norma ASTM D 1559; la norma ASTM D 4887, la cual describe el procedimiento para la selección de la calidad del cemento asfáltico (U.S. Department of Transportation, 2016).

Se requiere que el RAP (Recycled Asphalt Pavement) sea procesado en un material granular antes de su aplicación en las mezclas de asfalto. Se estipula que RAP procesado a utilizar sea lo más grueso posible, minimizando las partículas que pasen el tamiz No. 200, de este modo se permite un mejor control sobre el aporte de este material a la mezcla que se pretende diseñar (U.S. Department of Transportation, 2016).



Ilustración 41. Muestra de RAP

Fuente: (Sripath Technologies, LLC, 2023)

3.4.5.1 Procedimiento de diseño "Hot Mix Asphalt Recycling" para una mezcla de concreto asfáltico reciclado

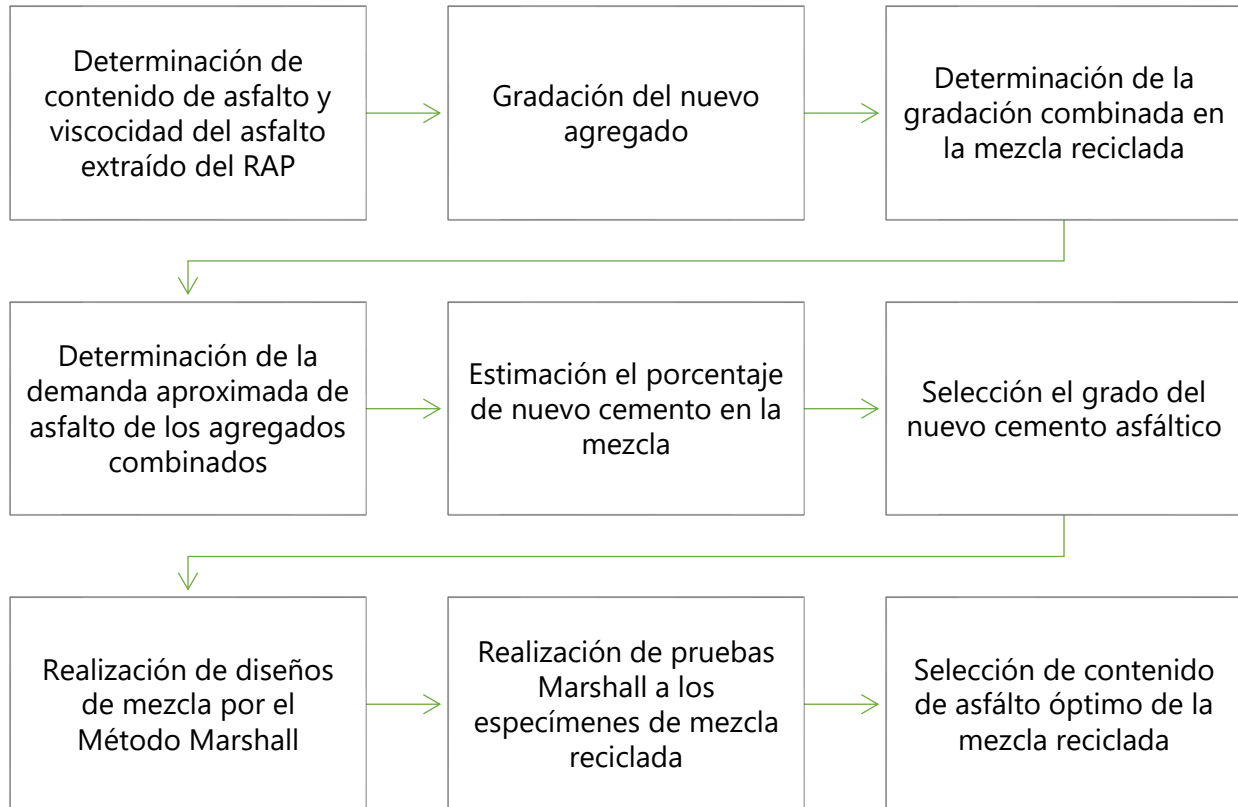


Ilustración 42. Procedimiento de diseño de concreto asfáltico reciclado

Elaboración propia, Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022)

3.4.5.1.1 Agregados combinados en la mezcla reciclada

Utilizando la granulometría del agregado RAP y el nuevo agregado, se calcula una gradación combinada que cumpla las especificaciones. Al establecer el porcentaje de RAP a utilizar, la cantidad de nuevo agregado se expresa con la variable r , en porcentaje. Por ejemplo, si se pretende utilizar 20% de RAP, por lo tanto, r sería igual a 80 (U.S. Department of Transportation, 2022).

La Tabla 17, contiene el desglose de las ecuaciones a utilizar en el diseño.

Tabla 17. Ecuaciones para proporcionar los materiales de una mezcla en caliente reciclada

	Para contenido de asfalto	
	Por peso de mezcla total	Por peso del agregado
% Nuevo asfalto, P _{nb}	$\frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100(100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$	$P_b - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100}$
% RAP, P _{sm}	$\frac{100(100 - r)}{100 - P_b} - \frac{(100 - r)P_b}{100 - P_b}$	$\frac{(100 + P_{sb})(100 - r)}{100}$
% Nuevo agregado, P _{ns}	$r - \frac{rP_b}{100}$	r
Total	100	100 + P _b
% Proporción de asfalto nuevo entre total de asfalto, R	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$	$\frac{100P_{nb}}{P_b}$

Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022).

3.4.5.1.2 Demanda aproximada de cemento asfáltico por los agregados combinados

U.S. Department of Transportation (2022), indica:

La forma más práctica es de asumir que la demanda de asfalto de los agregados combinados en la mezcla de concreto asfáltico propuesta es que sea igual al contenido óptimo de asfalto de una mezcla 100% virgen (Sin RAP).

“Con la demanda aproximada de asfalto, esto proveerá como base para una serie de mezclas de prueba para el diseño. Las mezclas de prueba varían en contenido de asfalto en incrementos de 0.5 a cada lado de la demanda de asfalto calculada” (U.S. Department of Transportation, 2022).

3.4.5.1.3 *Porcentaje estimado de nuevo cemento asfáltico en la mezcla*

La cantidad del nuevo cemento asfáltico a ser añadido a las mezclas de prueba se expresa como un porcentaje por peso de la mezcla total, se calcula por medio de la Ecuación 37. % de nuevo cemento asfáltico en porcentaje por peso de mezcla total, donde P_{nb} es el porcentaje de nuevo cemento asfáltico expresado como número entero, r es el porcentaje de nuevo agregado propuesto, P_b es el porcentaje estimado de contenido óptimo de asfalto de una mezcla virgen, y P_{sb} es el contenido de asfalto del RAP (U.S. Department of Transportation, 2022).

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100 * (100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$

Ecuación 37. % de nuevo cemento asfáltico en porcentaje por peso de mezcla total

Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022).

$$P_{nb} = P_b - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100}$$

Ecuación 38. Porcentaje de nuevo cemento asfáltico en porcentaje por peso del agregado

Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022).

3.4.5.1.4 *Selección de nuevo cemento asfáltico*

Por medio de Ilustración 43, se selecciona una viscosidad objetivo para el cemento de asfalto a seleccionar. Un objetivo comúnmente utilizado de viscosidad es en un punto intermedio de 2,000 poises. Este paso puede ser omitido para mezclas con porcentajes de RAP menores a 15%. (U.S. Department of Transportation, 2022).

- Se debe calcular una relación R del nuevo cemento asfáltico por medio de la siguiente ecuación.

$$R = \frac{100P_{nb}}{P_b}$$

Ecuación 39. Relación del nuevo asfalto sobre el contenido óptimo de asfalto

Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022).

- Tabulación de puntos A, B, y C en la Ilustración 43.

Se debe seleccionar el punto A, siendo este punto la viscosidad del asfalto del RAP. En la parte inferior se utiliza el valor de R y se extiende una línea vertical hasta llegar a la línea horizontal de la viscosidad objetivo, siendo este el punto B. Luego se extiende una línea recta desde el punto A al B hasta intersectar el lado derecho del cuadro, este siendo el punto C. El punto C es la viscosidad a 60°C del nuevo cemento asfáltico requerido para adherirse con el asfalto viejo del RAP, de modo que se logre obtener la viscosidad objetivo (U.S. Department of Transportation, 2022).

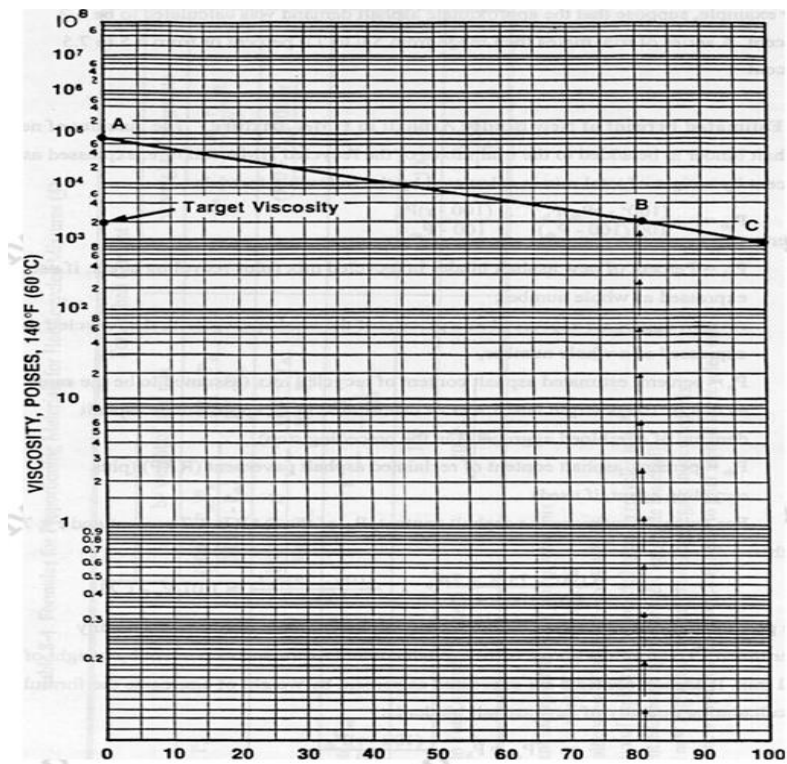


Ilustración 43. Cuadro de mezcla de viscosidad del asfalto

Fuente: (U.S. Department of Transportation, 2022)

3.4.5.1.5 Diseño de mezclas de prueba

“Los diseños de las mezclas de prueba son realizadas utilizando el Método Marshall” (U.S. Department of Transportation, 2022).

El procedimiento de diseño del Método Marshall es desglosado en el tema Método Marshall para diseño de mezcla de concreto asfáltico en la página 34 del presente informe.

3.4.5.1.6 Selección de porcentaje óptimo de cemento asfáltico para la mezcla reciclada

U.S. Department of Transportation (2022) explica: “El contenido óptimo de asfalto es seleccionado en base a los datos obtenidos anteriormente. Si se utiliza el Método Marshall en el diseño, el contenido óptimo de asfalto es seleccionado con 4% de contenido de vacíos de aire”.

El procedimiento detallado de selección de porcentaje óptimo de una mezcla de concreto asfáltico se encuentra en 3.3.1.6.

3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

Conocer las ventajas y desventajas del reciclaje del concreto asfáltico es importante ya que de esta manera se muestran los beneficios y el impacto que esta práctica puede llegar a tener. Al conocer los beneficios del reciclaje de concreto asfáltico, esta investigación puede llegar a ser el punto de inicio para que se empiece a implementar esta práctica en el país.

En los Estados Unidos de América se utilizan 89.2 millones de toneladas al año de concreto asfáltico reciclado para pavimentos. El concreto asfáltico reciclado se puede utilizar en varias ocasiones, lo cual genera una reducción de costos en materiales. 94% del concreto asfáltico reciclado se utiliza en pavimentos, el resto se incorpora en otros proyectos, siempre en el área de ingeniería civil (NAPA, 2013).



Ventajas

- El concreto asfáltico reciclado no solo se utiliza en pavimentos, puede ser utilizado en: techos, exterior de los edificios, estacionamientos, entradas de viviendas
- El uso de concreto asfáltico reciclado genera una reducción de costos, ya que se estima que 3.3 billones de dólares es el ahorro que se genera al utilizar este material
- En los Estados Unidos de América el promedio de 21.1% que se utilizó de concreto asfáltico reciclado en las nuevas mezclas de asfalto genero un ahorro de 7.80 dólares por tonelada comparado con el costo si la mezcla es con materiales totalmente nuevos
- Al utilizar el concreto asfáltico reciclado se conserva los recursos naturales que son utilizados en pavimentación, los cuales son, piedra, grava y arena, al igual que se utiliza menos petróleo
- El medioambiente se ve beneficiado con esta práctica ya que los efectos de gases invernadero se disminuyen. De 2009 a 2019 se estimó que hubo una reducción de 21.2 millones de toneladas de óxido de carbono
- Según la Asociación Nacional de Pavimento Asfáltico en 2019, más de 97 millones de toneladas de residuo asfáltico fueron reciclados, esto salvo 58.9 millones de yardas cúbicas de terreno
- Las mezclas asfálticas de concreto asfáltico reciclado pueden ser utilizadas en pavimentos con poco tráfico y temperaturas bajas, alto tráfico y temperaturas no congelantes, y en tráfico medio con temperaturas de congelación y baja humedad



Desventajas

- Una desventaja es la calidad del material que esta siendo reciclado, algunas de las porciones retiradas no son de buena calidad, esto depende de como se esta realizando el procedimiento de reciclaje y de donde esta siendo reciclado el concreto asfáltico
- Al momento de utilizar este tipo de mezclas no se tiene la misma vista para el usuario, ya que el color que adquiere no es tan atractivo como el color que se tiene cuando la mezcla es totalmente nueva
- Este proceso esta limitado a situaciones donde el pavimento que este siendo reciclado no tenga un deterioro estructural significativo y la profundidad del deterioro del pavimento esta limitada de 25 a 50 milímetros desde la superficie
- El proceso de reciclaje de mezcla asfáltica en caliente consume una alta cantidad de energia, ya que se trabaja con altas temperaturas, debido a esto este proceso emite gases de efecto invernadero
- El asfalto reciclado a medida que el tiempo pasa aumenta su dureza, pero este factor conlleva una desventaja, al volverse mas rigido se vuelve mas quebradizo, y si hay problemas con el suelo, se pueden producir baches o grietas
- En climas frios hay que tener cuidado al utilizar mezclas de concreto asfáltico reciclado, ya que si no se tiene un buen drenaje la lluvia y la nieve derretida pueden entrar al pavimento, en caso de que se congele el agua esta se expande y puede que levante secciones del pavimento generando problemas en el mismo

IV METODOLOGÍA

A continuación, se describirá la perspectiva utilizada para desarrollar el tema de investigación, las variables por evaluar, las técnicas, instrumentos y materiales utilizados para el desarrollo del proyecto y se explicarán los pasos realizados, desde el planteamiento del problema hasta los resultados.

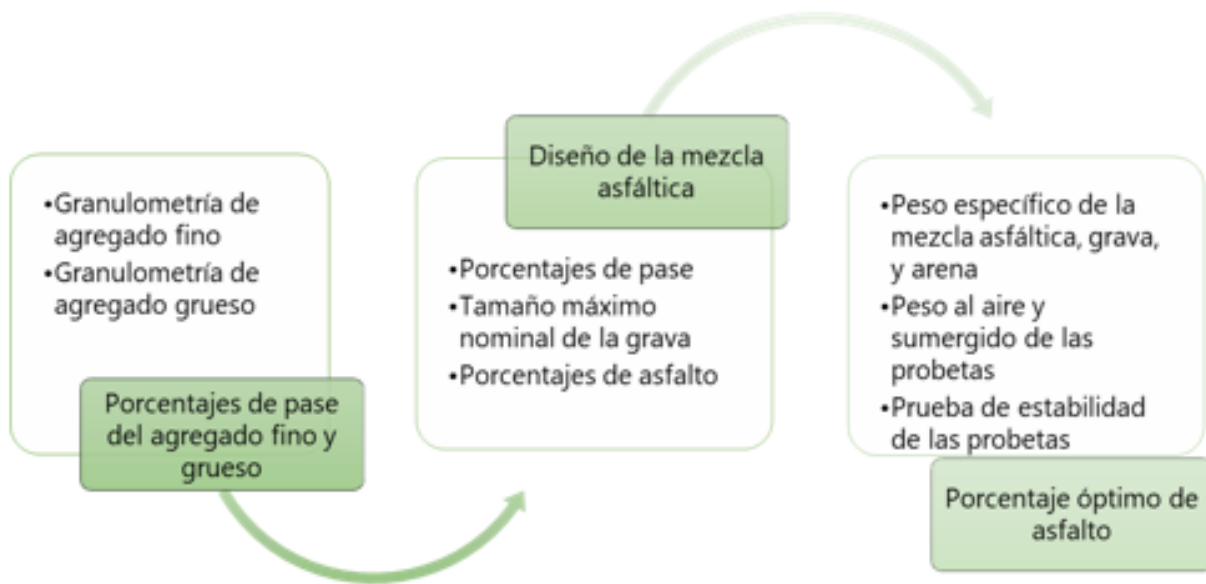
4.1 ENFOQUE

La investigación posee un enfoque cuantitativo. La granulometría de los agregados, el contenido de asfalto del residuo de concreto asfáltico, la ductilidad, grado de penetración de los asfaltos, y los diseños de mezcla por medio del método Marshall con los respectivos cálculos de porcentaje óptimo de asfalto, son los aspectos cuantitativos por medir de los materiales a evaluar y las mezclas a realizar en el laboratorio de Ingeniería Civil.

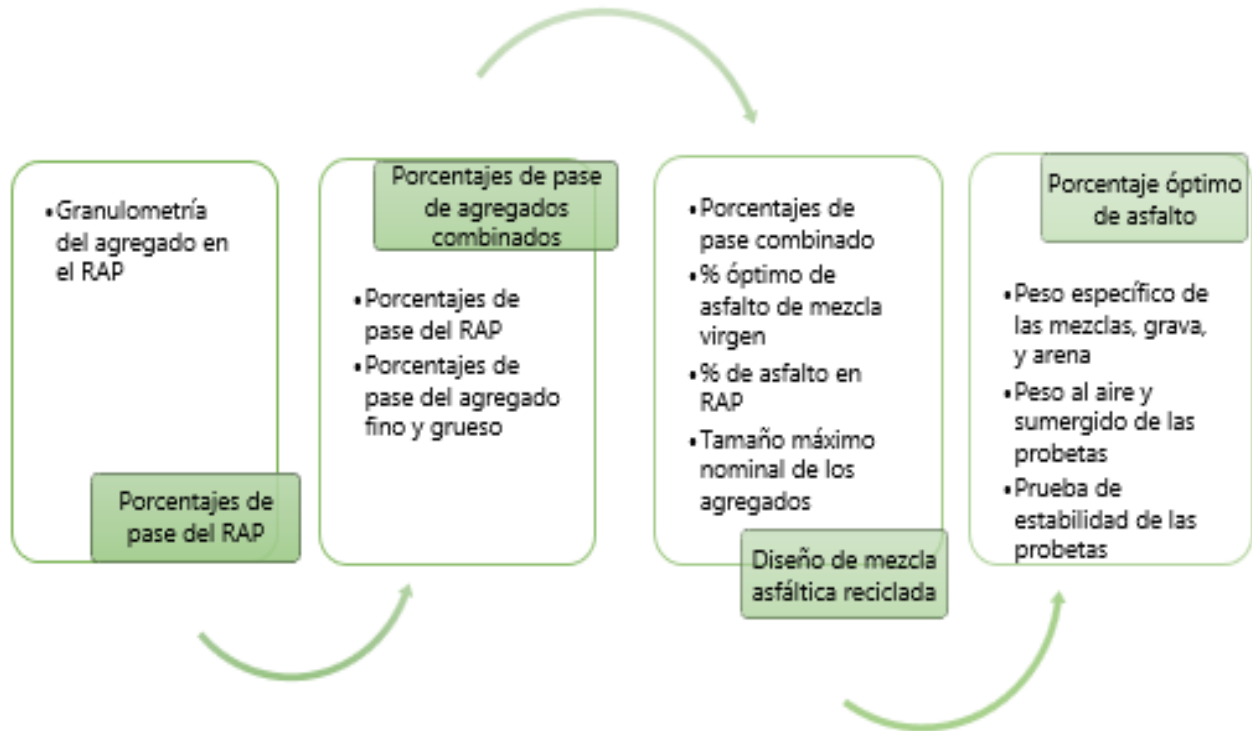
4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

A continuación, se definen las variables dependientes con las variables independientes correspondientes del proyecto de investigación

4.2.1 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN DE LA MEZCLA VIRGEN



4.2.1 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN DE LA MEZCLA RECICLADA



4.2.2 CALIFICACIÓN DEL ASFALTO



4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

A continuación, se describen las técnicas aplicadas, instrumentos y herramientas ingenieriles utilizadas para adquirir la información destinada a fundamentar la investigación y desarrollar los ensayos necesarios para la validación del proyecto de investigación.

4.3.1.1 Sitios web

Es la herramienta utilizada para la investigación de fuentes secundarias y terciarias en internet, la cual es necesaria para la recolección de información utilizada en el planteamiento de la problemática, justificación de la investigación y desarrollo del marco teórico del proyecto de investigación.

a) Instituto Nacional de Estadística de Honduras (INE)

En el sitio web oficial del Instituto Nacional de Estadística de Honduras se encuentran publicaciones y cifras del país de distintos sectores temáticos. Estas cifras son actualizadas anualmente y complementadas con análisis relevantes al cambio de las estadísticas en el tiempo. La página web fue utilizada para la recolección de estadísticas sobre la red vial nacional y los desechos sólidos de construcción, utilizada en el precedente y justificación del problema.



Ilustración 44. Sitio web de INE

b) Alcaldía Municipal del Distrito Central (AMDC)

En la página principal del sitio web de la Alcaldía Municipal del Distrito Central se encuentra toda la información referente a las leyes estipuladas por la secretaría municipal y la gerencia de gestión ambiental. El sitio web fue utilizado para la investigación de la problemática del proyecto de investigación, así mismo, se extrajo el documento llamado “plan de arbitrios” para la recolección de información adicional.



Ilustración 45. Sitio web de AMDC

c) U.S. Department of Transportation-Federal Highway Administration

La página web del Departamento de Transporte de los Estados Unidos de América posee una vasta base de datos con información relevante a todos los tipos de medio de transporte, desde aviación hasta ferrocarriles. Su base de datos posee datos y estadísticas referentes a la

construcción de las infraestructuras de todos los medios de transporte. Se utilizó este recurso para seleccionar el procedimiento a utilizar llamado "Hot Mix Asphalt Recycling" como guía de diseño de concreto asfáltico reciclado del proyecto de investigación. Se seleccionó esta página debido a alta cantidad de análisis de resultados con los procedimientos que se mencionan en esta página web y el procedimiento se seleccionó basado en la implementación de este mismo en más de 10 diferentes estados de los Estados Unidos de América.



Ilustración 46. Sitio web del Departamento de transporte de EE. UU.

d) AASHTO

La página web oficial de AASHTO brinda la información necesaria sobre las normativas que fueron utilizadas y replicadas en el laboratorio de Ingeniería Civil. Fue utilizada para fundamentar teóricamente la metodología de procedimiento de cada una de las normas AASHTO utilizadas.

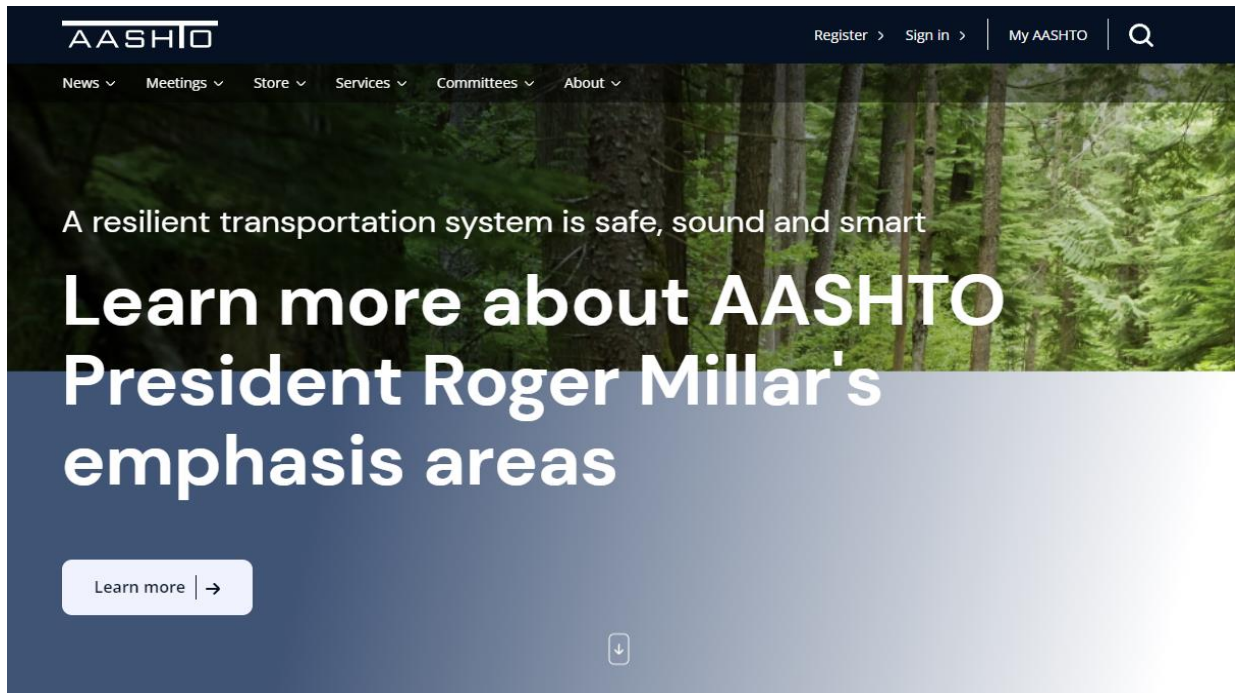


Ilustración 47. Sitio web de AASHTO

e) ASTM

La página web de la ASTM fue utilizada para la investigación de información referente a normativas aplicadas para el proyecto de investigación en el laboratorio de Ingeniería Civil.

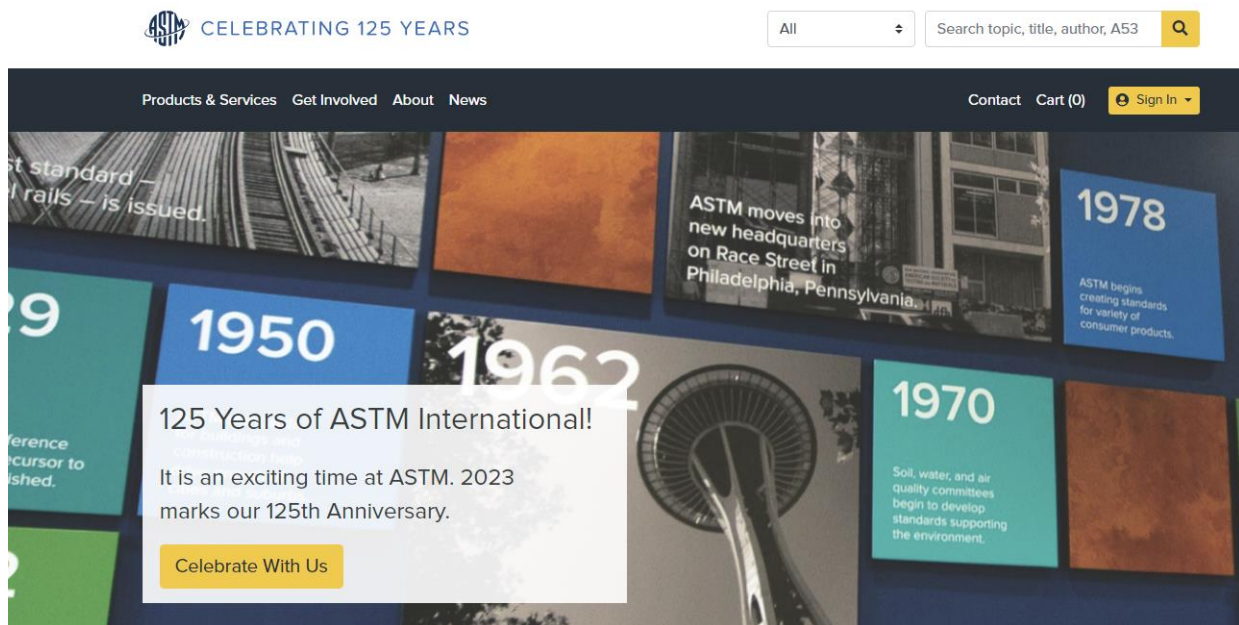


Ilustración 48. Sitio web de ASTM

4.3.1.2 Motores de búsqueda bibliográfica

Los motores de búsqueda en internet son herramientas que permiten la búsqueda de documentos, artículos, informes, ensayos, patentes, normativas, entre otros documentos que asisten en la recolección de información científica y académica.

a) Google académico

Google Académico

Cualquier idioma Buscar solo páginas en español

A hombros de gigantes

Ilustración 49. Buscador Google académico

b) Tribunal Superior de Cuentas (TSC)

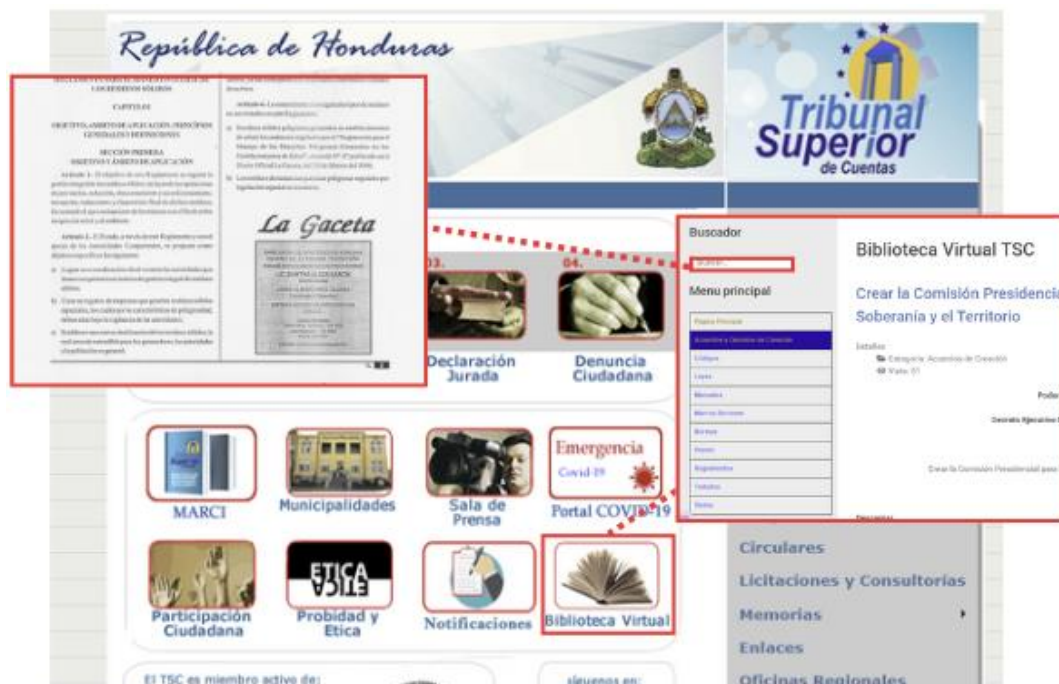


Ilustración 50. Buscador del TSC

4.3.1.3 Programas computacionales

a) Microsoft Word

El programa Microsoft Word es un software que se utiliza para poder crear documentos, con él se pueden crear informes, propuestas, boletines, catálogos, entre otros. El software Microsoft Word se utilizó para desarrollar el informe del proyecto de investigación.



Ilustración 51. Programa Microsoft Word

b) Microsoft Excel

Microsoft Excel es un programa que se utiliza para generar hojas de cálculos. Este programa permite crear tablas, gráficas, tablas dinámicas, entre otros usos. En el presente trabajo se utilizó Microsoft Excel para poder desarrollar cálculos, también con este programa se generan los gráficos.

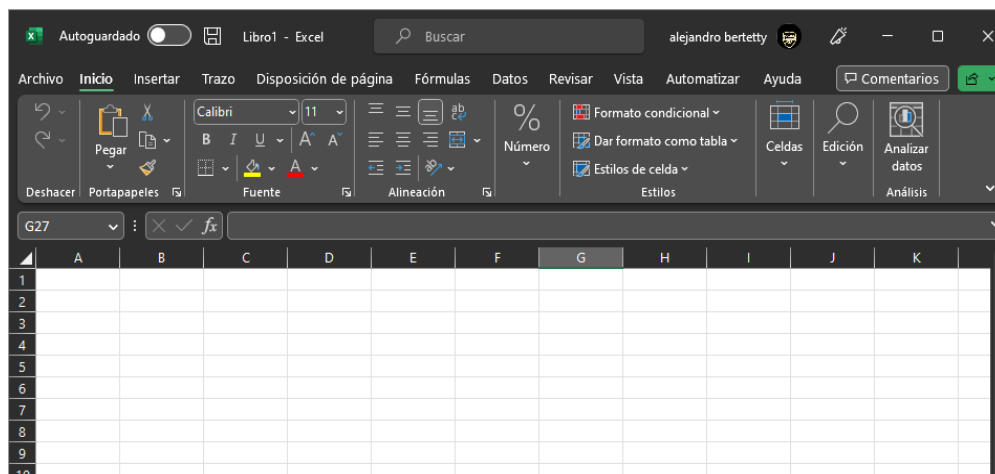


Ilustración 52. Programa Microsoft Excel

c) Google Maps

Google Maps funciona para ubicar puntos específicos, el programa calcula la ruta para llegar al punto de interés y también brinda lugares de interés cerca de este punto. Se hizo uso de esta aplicación para poder llegar a los puntos de interés que se desconocían, como el plantel de Santos Industria.

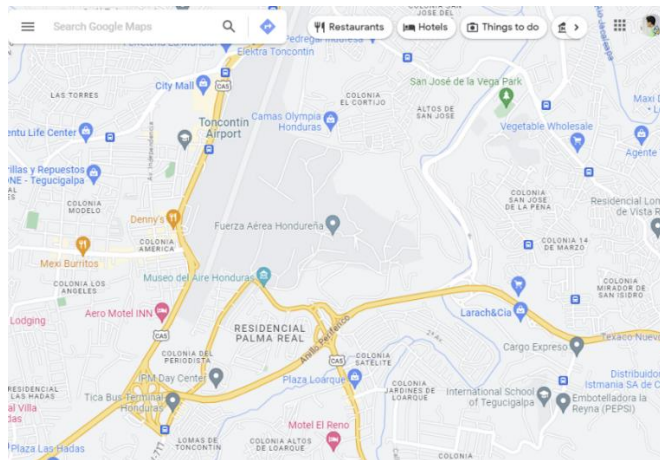


Ilustración 53. Programa Google Maps

d) Google Meet

La aplicación Google Meet funciona para realizar reuniones virtuales. Con el uso de esta aplicación, se realizaron reuniones para poder trabajar en el proyecto de forma virtual durante el transcurso del periodo.



Ilustración 54. Aplicación Google Meet

Fuente: (Vecteezy, 2023)

4.3.1.4 Equipo

A continuación, se presenta el equipo técnico utilizado para el desarrollo del informe y la elaboración

a) Teléfono Celular Inteligente

Teléfono celular inteligente se le conoce al dispositivo que tiene las funciones de un teléfono y una computadora. Este dispositivo se utilizó para poder tomar fotografías de algunos de los equipos utilizados, al igual que fotografías al momento de realizar los ensayos. Es una herramienta que funcionó para poder tener una comunicación de manera rápida y sencilla entre los integrantes del proyecto.



Ilustración 55. Dispositivo móvil

Fuente: (Dreamstime, 2023)

b) Computadora

La computadora es un dispositivo en el cual se pueden realizar tareas específicas, como cálculos, documentos, presentaciones, entre otros. La computadora se utilizó para poder desarrollar el informe, cálculos, y la presentación. Al igual que la computadora fue muy útil al momento de realizar la investigación ya que a través de ella se buscó la información, también fue una herramienta que ayudo con la comunicación, porque a través de esta se realizaron las reuniones a través de la aplicación de Google Meets.



Ilustración 56. Ordenador personal

Fuente: (Vecteezy, 2023)

c) Tamices

El tamiz es una herramienta que está formada por una malla metálica, esta malla tiene diferentes tamaños, ya que la función de esta es separar el material en grueso y fino. Esta herramienta se utilizó para poder conocer la granulometría de la arena, grava y el material recuperado.



Ilustración 57. Tamices utilizados

d) Tamizadora

Este es un equipo que ayuda a poder agitar la torre de tamices de una manera más sencilla y eficaz. En este equipo se coloca la torre de tamices de la granulometría a realizar, y esta automáticamente la agita, de esta manera las partículas quedan distribuidas en los diferentes tamices.



Ilustración 58. Tamizadora de agregado utilizada

e) Balanza

La balanza es una herramienta que se utiliza para determinar la masa de distintos materiales. En el transcurso del proyecto se hizo uso de la balanza en reiteradas ocasiones, ya que se tuvo que pesar todos los materiales utilizados en la mezcla de concreto asfáltico. También se utilizó al momento de realizar el ensayo de peso específico de los materiales y la granulometría de estos.



Ilustración 59. Balanza utilizada

f) Horno de cenizas

Este equipo se utiliza al momento que se necesita calentar o secar materiales. El asfalto se deja en el horno para que este pueda estar caliente al momento de ser utilizado, para la grava, arena y filler, el horno se utilizó para poder secarlos y calentarlos para que puedan ser utilizados al

momento de realizar la mezcla. Otro material que se calentó fueron los moldes para las probetas, ya que estos deben de estar calientes al momento que la mezcla es vertida en ellos.



Ilustración 60. Horno utilizado

g) Plancha calentadora

La plancha es un equipo que se utiliza para calentar el asfalto, con esta herramienta se logra que el asfalto esté en un estado líquido, ya que llega a temperaturas elevadas. Al momento de realizar la mezcla, esta se hace encima de la plancha, porque la mezcla se hace a temperaturas elevadas por lo cual la plancha cumple la función de mantener una temperatura elevada.



Ilustración 61. Plancha calentadora utilizada

h) Bomba succionadora

La función de la bomba succionadora es poder extraer el aire que se encuentra en los materiales. Esta se utiliza al momento de realizar el ensayo de peso específico, ya que se tiene que extraer todos los vacíos que se encuentran dentro de la grava, arena, y la mezcla de concreto asfáltico.



Ilustración 62. Bomba de succión utilizada

i) Extractor de espécimen Marshall

El extractor de espécimen Marshall, como lo dice su nombre, funciona para poder sacar los especímenes de los moldes sin dañarlos. Una vez que las mezclas estén frías se utiliza este equipo para poder extraerlas del molde y posteriormente probarlas.



Ilustración 63. Extractor de especímenes Marshall utilizado

j) Compactadora automática Marshall

La compactadora automática Marshall funciona para poder compactar las probetas por medio de un martillo, la cantidad de golpes para compactar depende del tráfico para el cual se está diseñando la mezcla.



Ilustración 64. Compactadora Marshall del laboratorio de Ingeniería Civil

k) Aparato de Cleveland

El aparato de Cleveland se utilizó para realizar el ensayo de punto de ignición e inflamación al cemento asfáltico PG 76-22. Este aparato funciona proporcionando calor a la copa de Cleveland donde se contiene el asfalto y genera una leve flama que se abanica por encima del asfalto. De este modo el asfalto aumenta en temperatura y en su punto de ignición genera una leve flama.



Ilustración 65. Aparato de Cleveland utilizado

l) Penetrómetro

El penetrómetro es un aparato que posee una aguja que sirve para penetrar en el cemento asfáltico a 25°C. Se utilizó para medir el grado de penetración del ligante asfáltico utilizado en el proyecto de investigación.



Ilustración 66. Penetrómetro del laboratorio de Ingeniería Civil

m) Máquina estabilizadora Marshall

La máquina estabilizadora de Marshall rige por la norma ASTM D1559, esta ejerce fuerza en compresión sobre las probetas de concreto asfáltico para medir el esfuerzo y la deformación que sufren los especímenes. Se utilizó para realizar las pruebas de estabilidad y flujo a todas las probetas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil.



Ilustración 67. Máquina estabilizadora de Marshall utilizada

n) Máquina para prueba de ductilidad

Este equipo como lo dice su nombre es para medir la ductilidad del asfalto. Se prueban tres briquetas al mismo tiempo, y la forma en que funciona es que, la máquina va estirando las

briquetas a una velocidad constante hasta que estas briquetas se rompan. Esta máquina se utilizó para determinar la ductilidad del asfalto PG76-22, que fue el asfalto utilizado en las mezclas.



Ilustración 68. Máquina de prueba de ductilidad utilizada

o) Moldes de especímenes Marshall

Los moldes de especímenes Marshall son moldes de acero que se componen de tres partes, la base, el cuerpo y el collar y tienen distintos tamaños, el que se utilizó en el ensayo fue un molde de 4 pulgadas. Estos moldes se utilizan para verter la mezcla en ellos y se forman las probetas que luego van a ser ensayadas en la máquina estabilizadora Marshall, en estos moldes también se realiza la compactación de las probetas mediante la compactadora Marshall.



Ilustración 69. Moldes de probetas Marshall

p) Balanza electrostática

La balanza electrostática se compone de una balanza, la que se puede observar en la parte superior de la imagen, de una estructura para subir y bajar la caja y cubeta, la caja de color negro que es donde se deposita el agua, y la cubeta, que es una cubeta metálica con orificios, que aquí es donde se colocan los especímenes. La balanza y la cubeta están conectados mediante una cadena y de esta forma es que la balanza puede dar el dato del peso del espécimen. La balanza electrostática se utiliza para conocer el peso sumergido de todas las probetas.



Ilustración 70. Balanza electrostática utilizada

q) Tarro de laboratorio

El tarro de laboratorio es un recipiente de vidrio que tiene marcas para determinar los mililitros de líquido que son vertidos en él, las marcas llegan hasta 600 mililitros. Este recipiente se utilizó en el ensayo de peso específico, ya que en él se vertió el agua y se colocó el material a ensayar.



Ilustración 71. Tarro de laboratorio

r) Olla de cocción

La olla de cocción es un equipo que puede mantener una temperatura constante durante largos periodos de tiempo. Este equipo se utilizó en el ensayo de Marshall, ya que previo a que se coloquen las probetas en la máquina estabilizadora de Marshall, las probetas deben de ser sumergidas en agua a 60 grados centígrados durante 30 minutos, por lo tanto, la olla de cocción es el equipo que se utiliza para mantener esta temperatura mientras las probetas están sumergidas.



Ilustración 72. Olla de cocción

s) Martillo de goma

El martillo de goma es un martillo que la cabeza es de goma, como lo dice su nombre. Se utiliza en el ensayo de peso específico para ejercer golpes al tarro. Es muy útil al momento de usarlo en dicho ensayo, ya que al momento de golpear el tarro los vacíos son extraídos con mayor facilidad por la bomba, su cabeza de goma es lo que hace posible su uso, porque un martillo convencional quebraría el tarro al momento de golpearlo.



Ilustración 73. Martillo de goma

4.4 MATERIALES

A continuación, se presentarán los materiales utilizados para el desarrollo del proyecto de investigación.

4.4.1 ASFALTO PG 76-22

El asfalto es un material que es derivado del petróleo, se obtiene de la destilación de dicho material. Dentro de la industria se pueden encontrar distintos tipos de asfalto, el que se utilizó en el presente trabajo es un asfalto PG 76-22, lo cual significa que es un asfalto modificado, el PG significa "performance grade". En la investigación el asfalto se utilizó en distintas ocasiones, ya que se le aplicaron distintos ensayos, dentro de los ensayos aplicados se encuentran los siguientes, ductilidad, punto de encendido y penetración. Además de estos ensayos el asfalto se utilizó en la mezcla de concreto asfáltico y en la mezcla de concreto asfáltico reciclado. El asfalto fue una donación de la empresa Santos Industria.



Ilustración 74. Asfalto PG76-22

4.4.2 RESIDUO DE CONCRETO ASFÁLTICO

El residuo de concreto asfáltico es lo que es demolido al momento que el pavimento llega a su vida útil o cuando ya está deteriorado. Este material se utilizó en las mezclas asfálticas de concreto asfáltico reciclado. Es el material que está siendo investigado, en la investigación se utilizaron dos

tipos de residuo de concreto asfáltico. No fue posible aplicar uno de los ensayos a este material, conocer el contenido de asfalto dentro del residuo de concreto asfáltico, ya que en el laboratorio no se cuenta con el equipo adecuado, por lo tanto, se tuvo que adquirir la ayuda de otro laboratorio. TECNISA es el laboratorio que realizó la prueba para conocer el contenido de asfalto dentro de las muestras de concreto asfáltico reciclado. El ensayo que se realizó en el laboratorio fue el ensayo de granulometría, al agregado que es separado al momento de conocer el contenido de asfalto, es al agregado que se utilizó para conocer la granulometría de las dos muestras.



Ilustración 75. Residuo de concreto asfáltico del anillo periférico

4.4.3 GRAVA $\frac{3}{4}$ "

La grava $\frac{3}{4}$ " es un material que se deriva de la trituración de piedra, y tiene distintos usos dentro de la construcción. En esta investigación la grava se utilizó en dos distintas aplicaciones, la primera fue la granulometría. Se le aplicó el ensayo de granulometría a la grava para poder saber el tamaño de la grava y así poder realizar el diseño de la mezcla. La segunda es que la grava se utilizó en la mezcla de concreto asfáltico y en la mezcla de concreto asfáltico reciclado, ya que la grava es uno de los agregados de las mezclas. La grava se adquirió en una ferretería.



Ilustración 76. Grava ¾"

4.4.4 ARENA

La arena puede provenir de dos distintos lugares, del dragado de ríos o de la trituración de rocas, en el proyecto la arena que se utilizó fue arena de río. Este material tiene distintas aplicaciones dentro de la construcción, pero al igual que la grava, en esta investigación se utilizó en dos distintas aplicaciones, las cuales son la granulometría, la mezcla de concreto asfáltico y la mezcla de concreto asfáltico reciclado. La granulometría de la arena ayudó para el diseño de la mezcla, y en las mezclas la arena es uno de los agregados que la componen. Este material se adquirió en la ferretería Larach & CIA.



Ilustración 77. Arena de río

4.5 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

4.5.1 INVESTIGACIÓN DE FUENTES SECUNDARIAS Y TERCIARIAS

Por medio de los sitios web y buscadores bibliográficos mencionados en instrumentos utilizados en el proyecto, se realizó una investigación a fondo de la deposición del residuo de concreto asfáltico por demolición de carpeta. Así mismo, se investigó el impacto ambiental que genera el residuo de concreto asfáltico, se seleccionó la información más relevante y los comentarios más impactantes sobre la recomendación de uso alternativo para el residuo. La información recopilada fue utilizada para realizar el precedente, la problemática y la justificación del proyecto, así mismo, el desarrollo del marco teórico fue realizado.

4.5.2 INVESTIGACIÓN DE FUENTES PRIMARIAS

Para obtener información complementaria, se indagó por conexiones personales a personas con experiencia en obras de pavimentación o en puestos con relevancia al tema de investigación para obtener información que avalara el tema propuesto para proyecto de investigación.

4.5.2.1 *Entrevistas a ingenieros con experiencia en obras de pavimentación*

Se realizaron entrevistas a ingenieros con experiencia en obras de pavimentación para obtener información adicional sobre la deposición del residuo de concreto asfáltico. Los puntos importantes recolectados de las entrevistas son los siguientes.

- La finalidad más común del residuo de carpeta asfáltica demolida es ser depositado en botaderos municipales.
- El tipo de reciclaje más practicado en el país para éste residuo es ser utilizado en capas de base o subbase.
- Se han construido carreteras en el país con material reciclado de concreto asfáltico demolido en la capa de base.

4.5.3 RECOLECCIÓN DE RESIDUOS DE CONCRETO ASFÁLTICO

Se recolectaron residuos de concreto asfáltico demolido con el propósito de analizarlos y realizar el diseño de concreto asfáltico reciclado con estos. Se obtuvieron 2 muestras diferentes originarias del Anillo Periférico.

4.5.3.1 *Adquisición de residuo de concreto asfáltico del anillo periférico en Santos Industria*



Ilustración 78. Residuo de carpeta asfáltica demolida (RAP1)



Ilustración 79. Residuo de carpeta asfáltica demolida (RAP2)

4.5.4 ADQUISICIÓN DE AGREGADOS NUEVOS PARA LA MEZCLA

Se requiere de tres agregados para implementarlos en la mezcla con residuo de concreto asfáltico a analizar, los cuales son: arena, grava y asfalto. La arena y grava fueron comprados en ferretería y el asfalto fue donado por Santos Industria como colaboración del sector privado.

4.5.4.1 *Adquisición de muestra de asfalto PG 76-22 en Santos Industria*



Ilustración 80. Tanque de cemento asfáltico en Santos Industria

4.5.5 ENSAYOS DE LABORATORIO A LOS AGREGADOS DE LA MEZCLA

Se realizaron los ensayos de granulometría y peso específico al agregado fino y grueso. Así mismo, al asfalto PG 76-22 se le realizaron los ensayos de ductilidad (ASTM D-113), penetración (ASTM D-5) y punto de ignición (ASTM D-92), con el propósito de evaluar las propiedades del cemento asfáltico proporcionado y diseñar la mezcla asfáltica reciclada utilizando datos verídicos.

4.5.5.1 *Granulometría de la grava $\frac{3}{4}$ " y arena*

Previo a realizar cálculos se tiene que realizar el proceso de tamizado. El primer paso es realizar el cuarteo de los agregados. El cuarteo se repite hasta que, con el restante que quede, este sea suficiente para llegar a la masa inicial requerida, por lo tanto, con el cuarteo también se pesan los agregados para poder obtener las masas iniciales.



Ilustración 81. Muestra de 3000g del agregado grueso



Ilustración 82. Muestra de 500g del agregado fino

Al tener las masas de cada agregado se procede a colocar los tamices en orden de mayor a menor. Para la grava los tamices que se utilizarán son, 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", #4, y #8. Para la arena son los siguientes, 3/8", #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200. Al tener los tamices en orden, se procede a ingresar los agregados en la torre de tamices y colocando una tapa en la parte superior y el fondo en la parte inferior, se colocan en la máquina tamizadora, y se dejan tamizar por un tiempo de 15 minutos.



Ilustración 83. Tamizadora

Al haber pasado los 15 minutos, se pesa el material retenido en cada tamiz, y se toman los datos de masa en gramos. Luego al tener todos estos datos de masa retenida en cada tamiz se puede comenzar a trabajar en los cálculos, a continuación, se muestran los resultados de masa retenida para la grava y la arena:

Tabla 18. Masa retenida por tamiz del agregado grueso

Granulometría Grava	
Tamiz	Masa Retenida (g)
2"	0
1 1/2"	0
1"	0
3/4"	114.5
1/2"	981.8
3/8"	998.1
#4	857.5
#8	41.6
Fondo	8.3
Total	3001.8

Tabla 19. Masa retenida por tamiz del agregado fino

Granulometría Arena	
Tamiz	Masa Retenida (g)
3/8"	0
#4	21.4
#8	32.2
#16	56.7
#30	131.9
#50	170.5
#100	77.8
#200	9.4
Fondo	0.8
Total	500.7

Con estos datos se procede a calcular el porcentaje de error, ya que si el porcentaje de error es mayor a 1% el proceso de tamizado no sería el correcto y se tendría que repetir. En este caso ambos resultados son menores a 1%. Para el porcentaje de error se utiliza la siguiente formula:

$$\% \text{ de error del ensayo} = \frac{\text{Masa total} - \text{Masa inicial}}{\text{Masa inicial}} * 100$$

A continuación, se presentan los procedimientos para % de error del ensayo de grava y arena:

Grava

Masa inicial: 3,000 gramos

Masa total: 3,001.8 gramos

$$\% \text{ de error del ensayo} = \frac{3,001.8 - 3,000}{3,000} * 100$$

$$\% \text{ de error del ensayo} = 0.06 \%$$

Arena

Masa inicial: 500.1 gramos

Masa total: 500.7 gramos

$$\% \text{ de error del ensayo} = \frac{500.7 - 500.1}{500.1} * 100$$

$$\% \text{ de error del ensayo} = 0.12\%$$

Al verificar que el porcentaje de error cumple, se procede a completar la tabla. La tabla contiene las siguientes columnas: Tamiz, diámetro del tamiz, masa retenida, masa retenida acumulada, % retenido, % retenido acumulado y % de pase. Las primeras tres columnas son datos, no se necesita hacer uso fórmula, pero, para las siguientes columnas se necesita realizar cálculos. Las fórmulas se presentan a continuación:

Masa retenida acumulada:

$$Masa \text{ retenida acumulada}_{Tamiz x} = \sum_1^{x-1} Peso \text{ retenido}_{tamiz}$$

% Retenido

$$\% \text{ Retenido} = \frac{Masa \text{ retenida}}{Masa \text{ total}} * 100$$

% Retenido acumulado

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \left(\frac{Masa \text{ retenida acumulada}}{Masa \text{ total}} \right) * 100$$

% de pase

$$\% \text{ pase} = 100\% - \% \text{ retenido acumulado}$$

Ahora se procederá a la demostración de los cálculos utilizando las fórmulas antes expuestas. Para la demostración de los cálculos solo se mostrará un ejemplo con la grava, ya que los cálculos son repetitivos, y se realizan de la misma manera para grava y arena.

El primer cálculo que se mostrará es el de masa retenida acumulada, para este ejemplo se utilizará los datos del tamiz $\frac{3}{4}$ " y el tamiz $\frac{1}{2}$ " de la grava.

Masa retenida acumulada $\frac{3}{4}$ " = 114.5 g

Masa retenida $\frac{1}{2}$ " = 981.8 g

$$\text{Masa retenida acumulada}_{\text{Tamiz } 1/2"} = 114.5 + 981.8$$

$$\text{Masa retenida acumulada}_{\text{Tamiz } 1/2"} = 1,096.3 \text{ g}$$

Luego este cálculo se repite para todos los tamices, en grava y arena.

El siguiente cálculo que se mostrará, es el cálculo del porcentaje retenido, para este ejemplo se utilizará el tamiz $\frac{3}{4}$ " de la grava, el cálculo es igual para los tamices restantes.

Masa retenida=114.5 g

Masa total= 3,001.8 g

$$\% \text{ Retenido} = \frac{114.5}{3,001.8}$$

$$\% \text{ Retenido} = 3.81\%$$

Al tener todos los porcentajes retenidos para cada tamiz correspondiente, se procede a calcular el porcentaje retenido acumulado. Para la demostración del porcentaje retenido acumulado se utilizará el dato del tamiz $\frac{1}{2}$ " y se hará uso de la Ecuación 8:

Masa retenida acumulada= 1,096.3 g

Masa total=3,001.8 g

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \left(\frac{1,096.3}{3,001.8} \right) * 100$$

$$\% \text{ Retenido acumulado} = 36.52\%$$

El último paso, para poder completar la tabla, es obtener el porcentaje de pase de cada tamiz.

Para la demostración del cálculo se utilizará el tamiz $\frac{3}{4}$ ", a continuación, se muestra el ejemplo:

Porcentaje retenido acumulado $\frac{3}{4}$ ": 3.81%

$$\% \text{ pase} = 100\% - 3.81\%$$

$$\% \text{ pase} = 96.19\%$$

Al realizar todos los cálculos anteriores para todos los tamices de la grava y arena, se completan sus respectivas tablas. A continuación, se mostrarán las tablas de la grava y arena, la primera tabla será la de la grava y la segunda tabla la de la arena.

Tabla 20. Granulometría del agregado grueso.

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
2"	50.8	0	0	0	0	100
1 1/2"	38.1	0	0	0	0	100
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	114.5	114.5	3.81	3.81	96.19
1/2"	12.7	981.8	1096.3	32.71	36.52	63.48
3/8"	9.52	998.1	2094.4	33.25	69.77	30.23
#4	4.76	857.5	2951.9	28.57	98.34	1.66
#8	2.38	41.6	2993.5	1.39	99.72	0.28
Fondo		8.3	3001.8	0.28	100.00	0.00
Total		3001.8		100.00		

Se definió un tamaño máximo nominal del agregado grueso de $\frac{3}{4}$ ", dato utilizado posteriormente.

Tabla 21. Granulometría del agregado fino

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
3/8"	9.52	0	0	0	0	100
#4	4.76	21.4	21.4	4.27	4.27	95.73
#8	2.38	32.2	53.6	6.43	10.71	89.29
#16	1.19	56.7	110.3	11.32	22.03	77.97
#30	0.59	131.9	242.2	26.34	48.37	51.63
#50	0.297	170.5	412.7	34.05	82.42	17.58
#100	0.149	77.8	490.5	15.54	97.96	2.04
#200	0.074	9.4	499.9	1.88	99.84	0.16
Fondo		0.8	500.7	0.16	100.00	0.00
Total		500.7		100.00		

Al completar las dos tablas, se procede a realizar los gráficos de granulometría. Para los gráficos se utilizarán dos componentes de la tabla, los cuales son, el diámetro de los tamices y el porcentaje de pase de cada tamiz. Se utilizará un gráfico de dispersión con líneas suavizadas y marcadores. En el eje "X" irá el diámetro de cada tamiz y en el eje "Y" irá el porcentaje de pase de cada tamiz, cabe destacar que en el eje "X" se hará una modificación, los valores se pondrán en escala logarítmica y en orden inverso. Al hacer esta modificación se tendrá el gráfico de cada granulometría, los cuales se muestran a continuación:

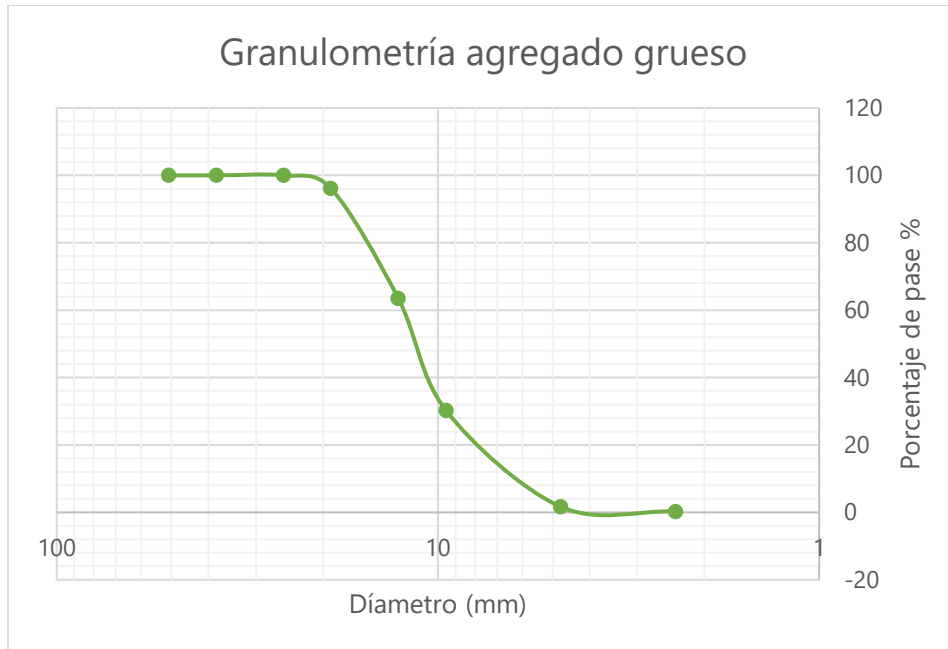


Ilustración 84. Gráfica curva granulométrica del agregado grueso

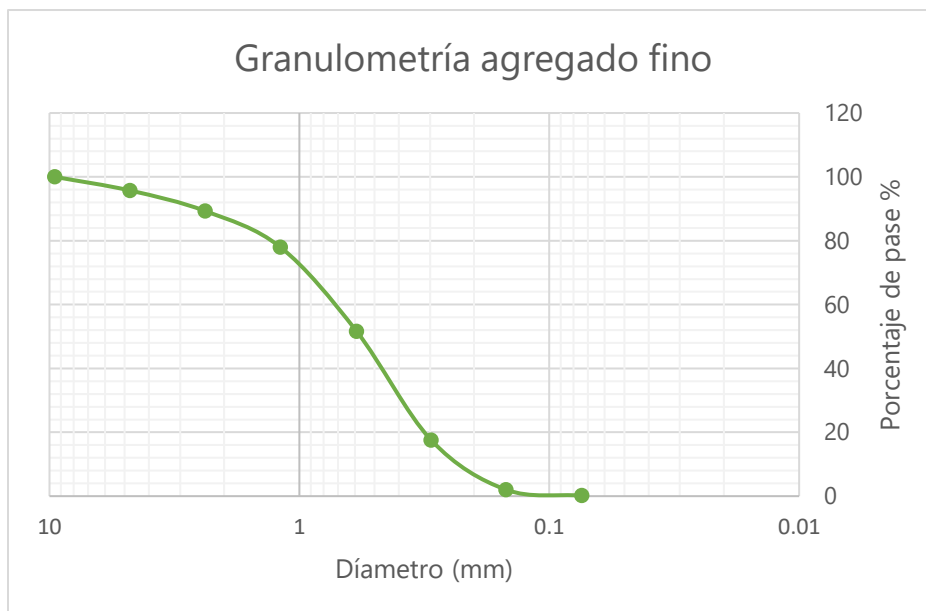


Ilustración 85. Gráfica curva granulométrica del agregado fino.

Al tener las dos gráficas se ha completado la granulometría para cada agregado, grava y arena.

4.5.5.2 *Peso específico de la arena*

Se realizó el ensayo de peso específico para el agregado fino antes de ser utilizada en la mezcla de concreto asfáltico. Para realizar el ensayo se realizaron los pasos correspondientes a seguir

como dicta la normativa. Se lavó en su totalidad la muestra adquirida y se dejó reposar en agua por 24 horas una muestra de 700g de arena. Posteriormente se extendió la muestra de arena sobre una superficie impermeable y se secó hasta que al colocar la arena dentro de un molde y golpearla 25 veces con el apisonador, la arena se suelte y no mantenga la forma del molde, lo que indica que la arena está en la condición saturada con superficie seca.



Ilustración 86. Secado de agregado fino

Se introdujeron 500g de arena saturada con superficie seca dentro del picnómetro y luego se añadió agua hasta cubrir la arena por completo. Por medio de la máquina succionadora, movimientos giratorios y leves golpes al picnómetro durante 20 minutos, se eliminaron las burbujas contenidas en la mezcla.



Ilustración 87. Extracción de aire del agregado fino

Posteriormente, se llenó de agua el picnómetro hasta la marca de 600ml. Se registraron los datos de peso de picnómetro con el agregado fino y agua hasta 600ml y peso de picnómetro más 600ml

de agua. Se extrajo la muestra de arena y se dejó secar en el horno por 24 horas, para luego registrar el peso de la muestra.



Ilustración 88. Peso de arena seca ensayo de peso específico

Los datos obtenidos luego de realizar el ensayo de peso específico de la arena son los siguientes:

Tabla 22. Datos registrados de ensayo de peso específico de agregado fino.

Datos	Peso (g)
Peso picnómetro + agua(600ml) + agregado	1268.5
Peso picnómetro + agua(600ml)	957.5
Peso bandeja vacía	346
Peso bandeja + arena seca	833.7

Al tener registrados los datos obtenidos por el ensayo, se realizaron los cálculos correspondientes al ensayo de peso específico de agregado fino.

Como primer paso se requiere obtener el peso al aire de la muestra seca al horno, la cual se obtuvo por medio de la diferencia entre del peso de la bandeja más la arena vacía y el peso de la bandeja vacía.

Peso al aire de la muestra seca al horno = Peso bandeja más arena seca – Peso bandeja vacía

Ecuación 40. Peso de la muestra seca del agregado

$$Peso\ al\ aire\ de\ la\ muestra\ seca\ al\ horno = 833.7g - 346g$$

$$Peso\ al\ aire\ de\ la\ muestra\ seca\ al\ horno = 487.7g$$

Como lo indica la normativa, se les asignaron las siguientes variables a los datos utilizados para el cálculo de los pesos específicos.

Tabla 23. Variables asignadas a datos de peso específico de agregado fino

	Descripción de la muestra	g
1	A=Peso al aire de la muestra seca al horno	487.7
2	B= Peso del picnómetro lleno de agua hasta 600ml	957.5
3	C= Peso del picnómetro; con la muestra y el agua	1268.5

A continuación, se muestran los cálculos realizados.

Peso específico Bulk calculado por medio de la Ecuación 17:

$$\text{Peso específico Bulk}_{fino} = \frac{487.7g}{957.5 + 500 - 1268.5}$$

$$\text{Peso específico Bulk}_{fino} = 2.580$$

Peso específico Bulk saturado con superficie seca, por medio de la Ecuación 18:

$$\text{Peso específico Bulk saturado}_{fino} = \frac{500}{957.5 + 500 - 1268.5}$$

$$\text{Peso específico Bulk saturado}_{fino} = 2.646$$

Peso específico aparente, por medio de la Ecuación 19:

$$\text{Peso específico aparente}_{fino} = \frac{487.7}{957.5 + 487.7 - 1268.5}$$

$$\text{Peso específico aparente}_{fino} = 2.760$$

Porcentaje de absorción, por medio de la Ecuación 20:

$$\% \text{Absorción}_{fino} = \frac{500 - 487.7}{487.7} * 100$$

$$\% \text{Absorción}_{fino} = 2.552\%$$

Resultados obtenidos:

Tabla 24. Pesos específicos del agregado fino.

Dato	Valor
Peso específico Bulk	2.580
Peso específico Bulk saturado con superficie seca	2.646
Peso específico aparente	2.760
Absorción (%)	2.522

4.5.5.3 *Peso específico de la grava*

Se realizó el ensayo de peso específico al agregado grueso, para evaluar el material antes de ser utilizado en la mezcla de concreto asfáltico. Por medio de la normativa se siguieron los pasos requeridos para realizar de forma correcta el ensayo. Como primer paso se seleccionó una muestra significativa por medio del cuarteo, la cual, después de haber sido lavada se dejó reposar en agua por 24 horas, de modo que la muestra llegara a su punto de saturación. Posteriormente, se secó la superficie de las partículas de la grava por medio de toallas y se pesó 500g de grava saturada con superficie seca. Se colocó el material dentro del picnómetro y se añadió agua hasta cubrir por completo la grava. por medio de la máquina succionadora se eliminaron las burbujas contenidas en la muestra por 20 minutos.



Ilustración 89. Extracción de aire del agregado grueso.

Al extraer el aire contenido en el agregado grueso, se procedió a llenar el picnómetro de agua hasta la marca de 600ml y se registró el peso. Luego, la grava contenida en el picnómetro fue

extraída y colocada en una bandeja de peso conocido, la cual fue colocada en el horno por 24 horas y posteriormente, se registró su peso seco.

Los datos obtenidos por medio del ensayo efectuado son los siguientes:

Tabla 25. Datos registrados del ensayo de peso específico del agregado grueso

Datos	Peso (g)
Peso picnómetro + agua(600ml) + agregado	1282.5
Peso picnómetro + agua(600ml)	962.4
Peso bandeja vacía	182.6
Peso bandeja + grava seca	680.3

Posteriormente se realizaron los cálculos correspondientes.

Se obtuvo el valor de peso al aire de la muestra seca al horno por medio de la Ecuación 40.

$$\text{Peso al aire de la muestra seca al horno} = 680.3g - 182.6g$$

$$\text{Peso al aire de la muestra seca al horno} = 497.7g$$

Se calculó el peso de la muestra saturada en agua, la cual la normativa asigna la variable C para cálculos posteriores. Este dato se encuentra por medio de la ecuación llamada "Peso de la muestra de agregado grueso saturada en agua" contenida en la página 46 del informe.

$$C = 1282.5g - 962.4g$$

$$C = 320.1g$$

Las variables asignadas a los datos obtenidos se reflejan en la siguiente tabla.

Tabla 26. Variables asignadas a los datos de peso específico del agregado grueso

N°	Descripción de la muestra	g
1	A=Peso al aire de la muestra seca al horno	497.7
2	B= Peso al aire, de la muestra saturada con superficie seca	500
3	Peso del picnómetro; con la muestra y el agua	1282.5
4	Peso del picnómetro; con agua hasta 600ml	962.4
5	C= N°3-N°4: Peso de la muestra saturada en agua	320.1

A continuación, se muestran los cálculos realizados.

Peso específico Bulk, por medio de la Ecuación 22:

$$\text{Peso específico Bulk}_{\text{grueso}} = \frac{497.7g}{500g - 320.1g}$$

$$\text{Peso específico Bulk}_{\text{grueso}} = 2.767$$

Peso específico Bulk saturado, por medio de la Ecuación 23:

$$\text{Peso específico Bulk}_{\text{grueso}} = \frac{497.7g}{500g - 320.1g}$$

$$\text{Peso específico Bulk}_{\text{grueso}} = 2.779$$

Peso específico aparente, por medio de la Ecuación 24:

$$\text{Peso específico aparente}_{\text{grueso}} = \frac{497.7g}{497.7g - 320.1g}$$

$$\text{Peso específico aparente}_{\text{grueso}} = 2.802$$

Porcentaje de absorción, calculado por medio de la Ecuación 25:

$$\% \text{Absorción}_{\text{grueso}} = \frac{500g - 497.7g}{497.7g} * 100$$

$$\% \text{Absorción}_{\text{grueso}} = 0.462\%$$

Resultados obtenidos:

Tabla 27. Pesos específicos del agregado grueso.

Dato	Valor
Peso específico Bulk	2.767
Peso específico saturado con superficie seca	2.779
Peso específico aparente	2.802
Absorción (%)	0.462

4.5.5.4 Ensayo de ductilidad al asfalto PG 76-22

Como lo dice su nombre, este ensayo es para poder determinar la ductilidad que tiene el asfalto. La ductilidad se determinará utilizando el ductilómetro, que es un equipo donde se colocan las briquetas de cemento asfáltico y estas son estiradas hasta el punto de romperse, al momento de romperse se tomará la distancia a la cual se rompió, esta distancia será la ductilidad que tiene el cemento asfáltico.



Ilustración 90. Ductilómetro

Para este ensayo el primer paso que se realiza es hacer una pasta de tiza y agua, primero se deshace la tiza y se mezcla con agua hasta conseguir la consistencia deseada. Esta pasta ayudará que el cemento asfáltico no se adhiera a las briquetas y a la placa, para así poder retirarlo con facilidad. Cuando la pasta tenga la consistencia requerida, esta se esparce en las briquetas y en la placa donde el cemento asfáltico irá.



Ilustración 91. Pasta de tiza esparcidas en briquetas

El agua que se utiliza en el ductilómetro tiene ser preparada, se prepara mezclando el agua con sal, esto va a prevenir que cuando el cemento asfáltico se encuentre en el ductilómetro no se hunda o flote. Primero se mezcla la sal con agua aparte para diluirla y luego se le agrega al ductilómetro.



Ilustración 92. Preparación del agua con sal

El asfalto se pone a calentar para que este esté de forma líquida, cuando ya se tenga la pasta esparcida en las briquetas y en la placa, se vierte el asfalto en las briquetas. En este paso hay que tener cuidado de que la parte del centro de la biqueta no quede gruesa, ya que es por esta parte que el asfalto se romperá, por lo tanto, tiene que quedar de la medida exacta. Luego se tiene que esperar hasta que la temperatura del asfalto esté a 25 grados centígrados para colocarla en el ductilómetro.



Ilustración 93. Briquetas de asfalto

Se colocan las tres briquetas en el ductilómetro, y se enciende, la velocidad a la que se irá estirando el asfalto será de 5 centímetros por minuto. El ensayo termina cuando las tres briquetas se rompan y se lee la distancia a la que se rompieron, esta será la ductilidad del asfalto.



Ilustración 94. Briquetas de asfalto en el ductilómetro

A continuación, se presentan las distancias en las cuales se rompieron las briquetas:

Tabla 28. Distancias de rompimiento de briquetas

Número de briqueta	Lectura	Unidad
1	15	Centímetros
2	16	Centímetros
3	21	Centímetros

4.5.5.5 *Ensayo de penetración al asfalto PG 76-22*

El ensayo de penetración se realiza para poder determinar el grado de dureza del asfalto, para poder determinar la dureza se utiliza el penetrómetro. Para saber la penetración, el penetrómetro tiene una aguja, la cual es la que penetra el asfalto, y la lectura de la penetración se lee en decimas de milímetro.



Ilustración 95. Penetrómetro

Previamente a realizar la penetración en el penetrómetro, se tiene que calentar el asfalto. Cuando el asfalto ya esté en estado líquido se vierte en una cápsula. Luego de haber vertido el asfalto en la cápsula se coloca en una bandeja con agua para que el asfalto se enfríe, y se toma la temperatura del asfalto hasta que este llegue a una temperatura de 25 grados centígrados. Cuando llega a la temperatura deseada ya se puede colocar en el penetrómetro, para posteriormente realizar el ensayo.



Ilustración 96. Cápsula de asfalto en agua

Al tener la cápsula en el penetrómetro, la aguja se tiene que bajar hasta que esté en contacto con la superficie del asfalto, pero sin ejercer ninguna presión. Al tener la aguja en posición se coloca el lector en 0, al tenerlo en 0 se deja caer la aguja por 5 segundos y luego se lee cuanto fue la penetración. Este proceso se repite 5 veces, se tiene que limpiar la aguja cada vez que se vaya a repetir, cabe destacar que, si algunas de las lecturas discrepan de las demás, esta no se tomará en cuenta al momento de obtener el promedio.



Ilustración 97. Ejemplo de ensayo de penetración

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos realizados, y el promedio de estos:

Tabla 29. Lecturas de penetración

Número de ensayo	Lectura (0.01 mm)	Incluido o descartado
1	15	Descartado
2	35	Incluido
3	31	Descartado
4	39	Incluido
5	39	Incluido
6	42	Incluido
7	34	Incluido
Promedio	37.8	

4.5.5.6 *Ensayo de punto de encendido e ignición al asfalto PG 76-22*

En el ensayo de punto de encendido se determinan dos cosas, la temperatura mínima a la cual se producen flamas instantáneas, el cual es el punto de encendido, también se determina el punto de inflamación del asfalto, al cual se le llama punto de inflamación. La razón de este ensayo es por motivos de seguridad, ya que esta temperatura dará un parámetro para que al momento de calentar el asfalto no se vaya a quemar o empiece a producir flamas. Aunque al momento de hacer las mezclas no se llegan a temperaturas tan elevadas, es importante controlar estas temperaturas para poder prevenir cualquier incidente.

Para este ensayo se utiliza el equipo de Cleveland, que en este equipo se incluye la copa abierta de Cleveland, que es donde irá el asfalto, y también una plancha con una extensión por donde sale gas para mantener la flama encendida que se pasa por encima del asfalto.



Ilustración 98. Equipo de Cleveland

Para poder vaciar el cemento asfáltico dentro de la copa de Cleveland, este se tiene que calentar hasta que se encuentre en un estado líquido, una vez el asfalto se encuentre líquido se procede a vaciarlo dentro de la copa de Cleveland hasta la marca interior.



Ilustración 99. Copa de Cleveland con asfalto

Luego se procede a preparar la plancha donde irá la copa, ya que se tiene que instalar un termómetro para monitorear la temperatura a la cual se producen las flamas en el asfalto. Con el termómetro listo se procede a colocar la copa en la plancha, y se coloca el termómetro dentro del asfalto, y se procede a encender la llama que se le pasará encima al asfalto.

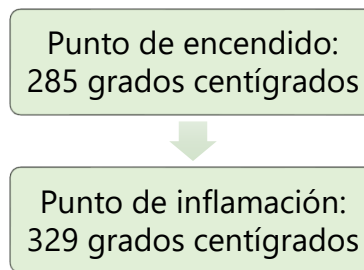


Ilustración 100. Equipo de Cleveland completo con termómetro

Al tener todo listo se comienza con el ensayo, la llama se pasará encima del asfalto cada grado centígrado que la temperatura aumente. La llama se debe de pasar a una velocidad constante,

que no sea rápido ni lento. Cuando se produzcan las primeras flamas en el asfalto, se tomará lectura de la temperatura a la cual se produjeron, ya que esta temperatura determina el punto de encendido. Luego se continúa con el ensayo, siempre pasando la llama a una velocidad constante cada vez que la temperatura aumente un grado centígrado. Durante este proceso se observan flamas instantáneas en el asfalto, pero se debe de tener cuidado ya que se debe de observar cuando la flama sea constante, que dure aproximadamente tres segundos, cuando esto ocurra se deberá tomar la lectura de la temperatura, ya que esta temperatura será el punto de inflamación del asfalto, aquí es donde el ensayo finaliza.

A continuación, se presentan las lecturas de temperatura del punto de encendido y el punto de inflamación:



4.5.6 PRUEBA MARSHALL CON AGREGADO VIRGEN

Realizados los ensayos de laboratorio para la evaluación de los nuevos agregados, se procedió a realizar los ensayos referentes al método Marshall para conocer el porcentaje óptimo de una mezcla de concreto asfáltico con agregados nuevos.

4.5.6.1 *Diseño de mezcla*

A través de los datos obtenidos en el ensayo de granulometría, se utilizó el valor del tamaño máximo nominal establecido de $\frac{3}{4}$ " para definir los tamaños de los tamices a utilizar para el diseño de mezcla y los límites superiores e inferiores correspondientes por medio de la siguiente tabla.

Mezclas cerradas									
Abertura de malla	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in (50 mm)	1 ½ in (37,5 mm)	1 in (25,0 mm)	¾ in (19,0 mm)	½ in (12,5 mm)	3/8 in (9,5 mm)	No. 4 (4,75 mm)	No. 8 (2,36 mm)	No. 16 (1,18 mm)
Graduaciones para mezclas de agregados (grueso, fino y filler)									
2 ½ in. (63mm)	100	...	...	...	...	...	...	...	...
2 in. (60mm)	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...	...
1 ½ (37,5mm)	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...	...
1 in. (25,0 mm)	60 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...	...
¾ in. (19,0 mm)	...	66 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...	...
½ in. (12,5 mm)	35 - 65	...	66 - 80	...	90 - 100	100	...	...	...
3/8 in. (9,5 mm)	...	...	...	66 - 80	...	90 - 100	100	...	...
No. 4 (4,75mm)	17 - 47	23 - 63	29 - 69	36 - 66	44 - 74	65 - 85	80 - 100	...	100
No. 8 (2,36mm)	10 - 36	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100	...	95 - 100
No. 16 (1,18mm)	...	...	...	...	...	...	40 - 80	...	85 - 100
No. 30 (600 µm)	...	...	...	...	...	...	36 - 66	...	70 - 95
No. 50 (300 µm)	3 - 15	4 - 16	5 - 17	5 - 19	5 - 21	7 - 23	7 - 40	...	45 - 75
No. 100 (150 µm)	...	...	...	...	...	...	3 - 20	...	20 - 40
No. 200 (75 µm)	0 - 6	0 - 6	1 - 7	2 - 8	2 - 10	2 - 10	2 - 10	...	9 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	5 - 12	6 - 12	7 - 12	8 - 12

Ilustración 101. Definición de los límites de pase para diseño de mezcla

Elaboración propia, Fuente: (Anguas, Alamilla, López, Romero, & Orca, 2004)

Al tener definidos los tamaños de tamices a utilizar, se procedió a tabular los porcentajes de pase obtenidos en el ensayo de granulometría para los tamaños de tamices requeridos, como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 30. Granulometría de los tamices definidos para el diseño de mezcla

Tamiz	Tamaño del tamiz	Granulometría gruesa	Granulometría fina
	mm	%Pase	%Pase
1"	25	100	100
3/4"	19	96.19	100
3/8"	9.5	30.23	100
#4	4.75	1.66	95.73
#8	2.36	0.28	89.29
#50	0.3	0	17.58
#200	0.075	0	0.16

Posteriormente se tabularon los límites superiores e inferiores de porcentaje de pase en la siguiente tabla.

Tabla 31. Límites de pase para el tamaño máximo nominal establecido

Tamiz	Tamaño del tamiz mm	Límite superior %Pase	Límite inferior %Pase	Filler %Pase
1"	25	100	100	100
3/4"	19	90	100	100
3/8"	9.5	56	80	100
#4	4.75	35	65	100
#8	2.36	23	49	100
#50	0.3	5	19	100
#200	0.075	2	8	75

Se obtuvo el siguiente gráfico de los límites de porcentaje de pase, al graficar los porcentajes de pase versus tamaño en milímetros del tamiz.

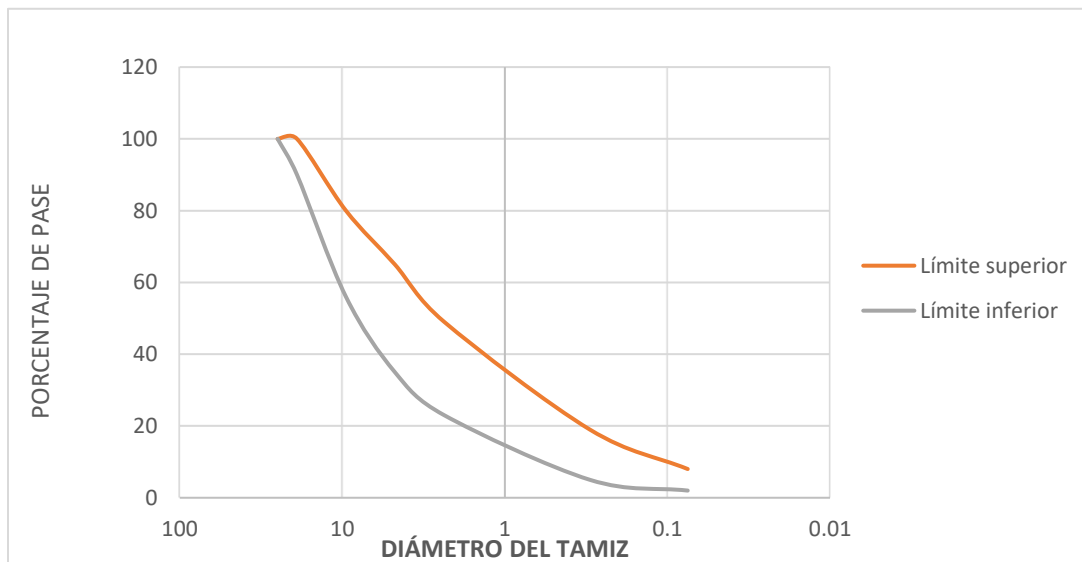


Ilustración 102. Límites de % de pase para la mezcla realizada

Por medio del uso de la tabla a continuación configurada en Excel con las ecuaciones descritas en Ecuaciones programadas en Excel en la Tabla 10, se definieron los porcentajes ideales de los agregados de forma iterativa de modo que, al graficar la curva generada por la sumatoria de porcentajes de pase del agregado grueso, fino, y el filler, esta quedara dentro de los límites, como se muestra en la Ilustración 103.

Tabla 32. Porcentajes ideales definidos para las mezclas de concreto asfáltico

% Ideales de agregados					Gráfica
Tamiz	Tamaño del Tamiz mm	Gruesa %	Fina %	Filler (2 a 5) %	Fina + Gruesa
		50	50	4	%Pase
1"	25	48.00	48.00	4.00	100.00
3/4"	19	46.17	48.00	4.00	98.17
3/8"	9.5	14.51	48.00	4.00	66.51
#4	4.75	0.80	45.95	4.00	50.75
#8	2.36	0.13	42.86	4.00	46.99
#50	0.3	0.00	8.44	4.00	12.44
#200	0.075	0.00	0.08	3.00	3.08

Se definieron los porcentajes ideales de los agregados, 50% para el agregado grueso y fino, se determinó que un porcentaje de 4% de filler es el ideal para las mezclas.

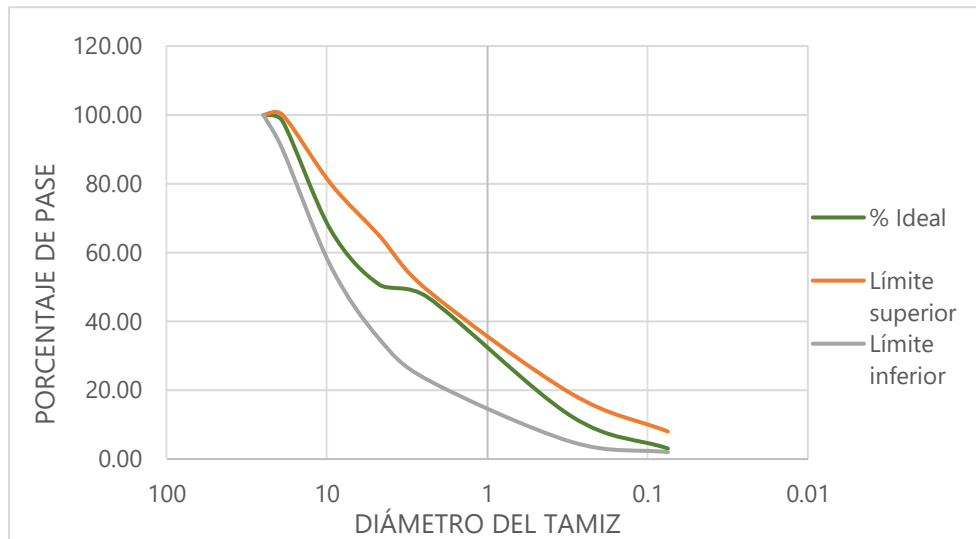


Ilustración 103. Curva de %pase ideal de los agregados a utilizar para las mezclas

Al haber obtenido los porcentajes ideales para los agregados, se procedió a calcular el peso de cada agregado para probetas de concreto asfáltico con masa de 1200 gramos para los porcentajes de asfalto de 4%, 5%, 6%, 7%, y 8%. Para realizar los cálculos se utilizó la siguiente tabla programada en Excel con las ecuaciones descritas en Ecuaciones programadas en Excel en la Tabla

Tabla 33. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 4% de asfalto

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	4	3.846153846	46.15
Grava	48	46.15384615	553.85
Arena	48	46.15384615	553.85
Filler	4	3.846153846	46.15
Total	104	100	1200

Por último, para completar el diseño de mezcla con 4% de asfalto, se definió la proporción del filler requerido como indica la normativa; 25% de retenido de tamiz 200 y 75% de pase 200 del total del filler requerido en la mezcla. Los datos se calcularon de la siguiente manera:

$$25\% \text{ retenido } 200 = 0.25 * \text{Peso total requerido de filler}$$

Ecuación 41. 25% de filler retenido de tamiz 200

$$25\% \text{ retenido } 200 = 0.25 * 46.15g$$

$$25\% \text{ retenido } 200 = 11.54g$$

$$75\% \text{ pase } 200 = 0.75 * \text{Peso total requerido de filler}$$

Ecuación 42. 75% de pase 200 de filler

$$75\% \text{ pase } 200 = 0.75 * 46.15g$$

$$75\% \text{ pase } 200 = 34.62g$$

Se repitió el procedimiento para los porcentajes restantes de asfalto especificados.

- Mezcla de concreto asfáltico con 5% de asfalto

Tabla 34. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 5% de asfalto

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	5	4.761904762	57.14
Grava	48	45.71428571	548.57
Arena	48	45.71428571	548.57
Filler	4	3.80952381	45.71
Total	105	100	1200

$$25\% \text{ retenido } 200 = 11.43g$$

$$75\% \text{ pase } 200 = 34.29g$$

- Mezcla de concreto asfáltico con 6% de asfalto

Tabla 35. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 6% de asfalto

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	6	5.660377358	67.92
Grava	48	45.28301887	543.40
Arena	48	45.28301887	543.40
Filler	4	3.773584906	45.28
Total	106	100	1200

25% retenido 200 = 11.32

75% pase 200 = 33.96g

- Mezcla de concreto asfáltico con 7% de asfalto

Tabla 36. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 7% de asfalto

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	7	6.542056075	78.50
Grava	48	44.85981308	538.32
Arena	48	44.85981308	538.32
Filler	4	3.738317757	44.86
Total	107	100	1200

25% retenido 200 = 11.21g

75% pase 200 = 33.64g

- Mezcla de concreto asfáltico con 8% de asfalto

Tabla 37. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 8% de asfalto

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	8	7.407407407	88.89
Grava	48	44.44444444	533.33
Arena	48	44.44444444	533.33
Filler	4	3.703703704	44.44
Total	108	100	1200

25% retenido 200 = 11.11g

75% pase 200 = 33.33g

4.5.6.2 Procedimiento Marshall en laboratorio

Al obtener los pesos de los materiales para las 5 mezclas de diferentes porcentajes de asfalto, se procedió a realizar el ensayo Marshall en el laboratorio de Ingeniería Civil. Se realizó 1 probeta para cada contenido de asfalto, con un total de 5 probetas realizadas. Se siguió paso a paso las indicaciones de elaboración especificadas por la normativa ASTM D1559.



1: Dejar en el horno los agregados



2: Dejar los moldes aceitados en el horno



3: Colocar en una pana la cantidad de agregados definidos en el diseño



4: Añadir el asfalto a la mezcla y mezclar



5: Mezclar sobre una plancha caliente



6: Añadir la mezcla homogénea dentro del molde



7: Realizar ensayo de gravedad específica a la mezcla suelta



8: Compactar ambos lados de la probeta



9: Retirar la probeta del molde



10: Registrar las dimensiones de la probeta



11: Registrar el peso al aire y sumergido de la probeta



12: Sumergir la probeta por 30 minutos en agua a 60°C



13: Colocar la probeta seca en la máquina estabilizadora Marshall



14: Registrar los datos de carga máxima y deformación en ese punto

Luego de haber realizado el procedimiento de elaboración y prueba de probetas, los datos obtenidos de dimensiones de probetas, pesos, resultados de prueba de estabilidad Marshall, y de peso específico de las mezclas sueltas para cada porcentaje de asfalto, son los siguientes:

Tabla 38. Dimensiones de probetas de mezcla virgen

Porcentaje	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura Promedio (cm)	Volumen (cm ³)
4%	10.16	10.16	10.16	6.49	6.51	6.50	526.97578
5%	10.15	10.15	10.15	6.55	6.64	6.60	533.62573
6%	10.14	10.16	10.15	5.91	5.89	5.90	477.39073
7%	10.16	10.04	10.10	5.94	5.99	5.97	477.90665
8%	10.01	10.16	10.09	5.94	5.63	5.79	462.10966

Tabla 39. Carga y deformación registrada de mezclas vírgenes

Porcentaje	Carga (kN)	Carga (lb)	Deformación (mm)	Deformación (0.01 in)
4%	2.87	645.2	2.158	8.49
5%	6.05	1360.09	4.289	16.88
6%	3.95	887.99	4.31	16.96
7%	3.81	856.52	4.193	16.5
8%	3.50	786.83	4.539	17.86

Tabla 40. Pesos de las probetas de mezcla virgen

Porcentaje	Peso al aire (g)	Peso sumergido (g)
4%	1,031.50	526.06
5%	1,059.90	544.86
6%	955.50	522.21
7%	973.90	514.84
8%	991.30	530.70

Tabla 41. Datos de peso específico de la mezcla virgen

Porcentaje	Masa de asfalto (g)	Peso picnómetro + agua a 600ml	Peso picnómetro + asfalto + agua a 600ml
4%	128.20	968.30	1,045.40
5%	108.00	968.30	1,031.90
6%	149.50	968.20	1,056.00
7%	148.90	968.10	1,053.80
8%	165.10	968.10	1,059.40

4.5.6.3 Determinación de porcentaje óptimo de asfalto

Para determinar el porcentaje óptimo de la mezcla virgen se realizaron una serie de cálculos secuenciales de 12 pasos, los cuales fueron utilizados para elaborar las gráficas de estabilidad, gravedad específica de las pastillas compactadas (G_{mb}), y porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (P_a) vs % de asfalto. El procedimiento de cálculo realizado para 4% de asfalto se desglosa a continuación.

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (G_{mb})

La gravedad específica de la pastilla compactada de 4% se obtuvo por medio de la Ecuación 26. Gravedad específica de las pastillas compactadas.

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_a - W_s} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

Donde:

G_{mb} : Gravedad específica de las pastillas compactadas

W_s : Peso sumergido (g)

W_a : Peso al aire (g)

$$G_{mb} 4\% = \frac{1031.50}{1031.50 - 526.06} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$G_{mb} 4\% = 2.0408 gr/cm^3$$

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

La gravedad específica de las mezclas sueltas realizada se calculó por medio de la Ecuación 27. Gravedad específica de mezcla suelta.

$$Gmm = \frac{Wm}{W_{p+a} + Wm - W_{p+a+m}} = gr/cm^3$$

Donde:

Gmm: Gravedad específica de la mezcla suelta

Wm: Peso del material

Wp+a: Peso de picnómetro + agua

Wp+a+m: Peso de picnómetro + agua + material

$$Gmm \text{ 4\%} = \frac{128.20}{968.30 + 128.20 - 1045.40} = gr/cm^3$$
$$Gmm = 2.5088 \text{ gr/cm}^3$$

3. Peso específico de los agregados

Se asignaron las siguientes variables a los datos obtenidos de los ensayos de pesos específicos de los agregados finos y gruesos. Se utilizaron los datos de peso específico del filler y del cemento asfáltico recomendados por UNITEC.

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010 gr/cm^3

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Se utilizaron los datos obtenidos anteriormente en la Tabla 33. Pesos requeridos de los agregados para mezcla con 4% de asfalto, para completar la tabla a continuación. La tabla fue generada para representar los datos que fueron asignados con las variables que se muestran en ella.

Material	% Por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	4%	$\frac{4}{104} * 100 = 3.84$	Pb
Grava	48.00%	$\frac{48}{104} * 100 = 46.15$	P1
Arena	48.00%	$\frac{48}{104} * 100 = 46.15$	P2
Filler	4.00%	$\frac{4}{104} * 100 = 3.84$	P3
Total	104%	100%	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_s \text{ 4\%} = 46.15 + 46.15 + 3.84$$

$$P_s \text{ 4\%} = 96.1538$$

5. Peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

El peso específico Bulk del agregado total para la mezcla de 4% de asfalto se calculó por medio de la Ecuación 29. Peso específico Bulk del agregado total.

$$Gsb = \left[\frac{P_1 + P_2 + P_3}{\left(\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ 4\%} = \left[\frac{46.15 + 46.15 + 3.84}{\left(\frac{46.15}{2.767} + \frac{46.15}{2.580} + \frac{3.84}{2.650} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ 4\%} = 2.6694 \text{ gr/cm}^3$$

6. Peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

Se calculó el peso específico de la mezcla suelta para la mezcla de 4% de cemento asfáltico por medio de la Ecuación 30. Peso específico efectivo de la mezcla suelta.

$$Gse = \left[\frac{100 - P_b}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ 4\%} = \left[\frac{100 - 3.84}{\left(\frac{100}{2.5088} - \frac{3.84}{1.010} \right)} \right]$$

$$G_{se} 4\% = 2.6671 \text{ gr/cm}^3$$

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

Se obtuvo el valor del asfalto absorbido por el agregado de la mezcla de 4% de cemento asfáltico por medio de la Ecuación 31. Asfalto absorbido por el agregado.

$$Pba = 100 * \left[\frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{sb} * G_{se}} \right] * G_b$$

$$Pba 4\% = 100 * \left[\frac{2.6671 - 2.6694}{2.6694 * 2.6671} \right] * 1.010$$

$$Pba 4\% = -0.0325$$

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

Para el cálculo del contenido efectivo de asfalto en la mezcla de 4% de asfalto se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$Pbe = P_b - \frac{Pba}{100} * P_s$$

$$Pbe 4\% = 3.84 - \frac{-0.0325}{100} * 96.1538$$

$$Pbe 4\% = 3.8774$$

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

Se calculó el porcentaje de vacíos del agregado mineral por medio de la Ecuación 33. Porcentaje de vacíos de agregado mineral, como se muestra a continuación.

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

$$VMA 4\% = 100 - \frac{2.0408 * 96.1538}{2.6694}$$

$$VMA 4\% = 26.489\%$$

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

El porcentaje de vacíos llenos de aire de las probetas se obtuvo por medio de la Ecuación 34. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada. El procedimiento de cálculo realizado es el siguiente.

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

$$Pa\ 4\% = 100 * \frac{2.5088 - 2.0408}{2.5088}$$

$$Pa\ 4\% = 18.654\%$$

11. Estabilidad corregida

Se realizó la corrección por volumen de la estabilidad obtenida por la máquina de estabilidad Marshall por medio de la Tabla 42.

$$\text{Volumen probeta } 4\% = 526.98\text{ cm}^3$$

Tabla 42. Selección de factor de corrección para probeta virgen de 4% de asfalto

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen,		Correlation Ratio
	in.	mm	
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 ¹ / ₁₆	27.0	5.00
226 to 237	1 ¹ / ₈	28.6	4.55
238 to 250	1 ³ / ₁₆	30.2	4.17
251 to 264	1 ¹ / ₄	31.8	3.85
265 to 276	1 ⁵ / ₁₆	33.3	3.57
277 to 289	1 ³ / ₈	34.9	3.33
290 to 301	1 ⁷ / ₁₆	36.5	3.03
302 to 316	1 ¹ / ₂	38.1	2.78
317 to 328	1 ⁹ / ₁₆	39.7	2.50
329 to 340	1 ⁵ / ₈	41.3	2.27
341 to 353	1 ¹¹ / ₁₆	42.9	2.08
354 to 367	1 ³ / ₄	44.4	1.92
368 to 379	1 ¹³ / ₁₆	46.0	1.79
380 to 392	1 ⁷ / ₈	47.6	1.67
393 to 405	1 ¹⁵ / ₁₆	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 ¹ / ₁₆	52.4	1.39
432 to 443	2 ¹ / ₈	54.0	1.32
444 to 456	2 ³ / ₁₆	55.6	1.25
457 to 470	2 ¹ / ₄	57.2	1.19
471 to 482	2 ⁵ / ₁₆	58.7	1.14
483 to 495	2 ³ / ₈	60.3	1.09
496 to 508	2 ⁷ / ₁₆	61.9	1.04
509 to 522	2 ¹ / ₂	63.5	1.00
523 to 535	2 ⁹ / ₁₆	65.1	0.96
536 to 546	2 ⁵ / ₈	66.7	0.93
547 to 559	2 ¹¹ / ₁₆	68.3	0.89
560 to 573	2 ³ / ₄	69.9	0.86
574 to 585	2 ¹³ / ₁₆	71.4	0.83
586 to 598	2 ⁷ / ₈	73.0	0.81
599 to 610	2 ¹⁵ / ₁₆	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

$$\text{Estabilidad corregida} = \text{Estabilidad} * \text{factor de corrección}$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 2.87 \text{ kN} * 0.96$$

$$\text{Estabilidad corregida} = 2.755 \text{ kN}$$

- Resultados de las demás probetas

Se realizó el mismo procedimiento explicado anteriormente para obtener los resultados de las probetas de 5%, 6%, 7%, y 8% de asfalto. Los resultados obtenidos son los siguientes.

Tabla 43. Características mecánicas de las mezclas con agregado virgen

Características	4%	5%	6%	7%	8%
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.041	2.058	2.021	2.122	2.152
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.509	2.432	2.423	2.356	2.237
Peso específico bulk, Gsb	2.669	2.669	2.669	2.669	2.669
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.667	2.617	2.645	2.598	2.478
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-0.033	-0.762	-0.349	-1.034	-2.923
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	3.877	5.488	5.989	7.508	10.114
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	26.489	26.579	22.065	25.725	25.348
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	18.655	15.398	8.989	9.953	3.797
Estabilidad (kN)	2.755	5.808	4.503	4.343	4.165
Flujo 0.01 in	8.49	16.88	16.96	16.50	17.86

12. Porcentaje óptimo de asfalto

Para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla con agregado virgen, se realizaron las gráficas de estabilidad, Gmb, y Pa vs % de asfalto. Se seleccionó el porcentaje de asfalto correspondiente a la estabilidad y Gmb máximo, así como el porcentaje de asfalto que corresponde a 4% de vacíos. Con estos 3 porcentajes de asfalto se obtuvo el promedio, el cual es el porcentaje óptimo de la mezcla.

- Gráfica Estabilidad vs % de asfalto

Por medio de la gráfica se obtuvo un porcentaje de 5.05% de asfalto correspondiente a la estabilidad máxima alcanzada por las 5 probetas realizadas.

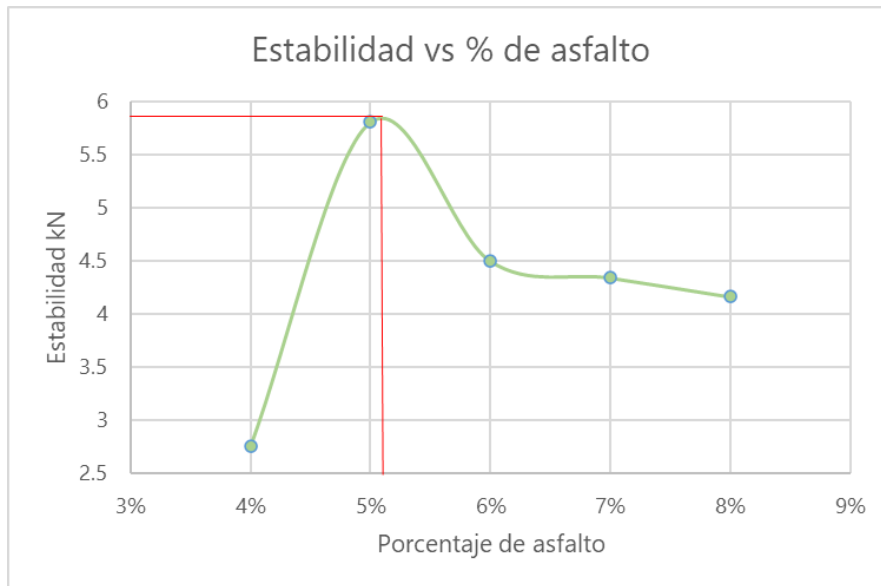


Ilustración 104. Gráfica estabilidad vs %asfalto de la mezcla virgen

- Gráfica Pa vs % de asfalto

Se obtuvo un porcentaje de 7.75% de asfalto correspondiente a 4% de porcentaje de vacíos.

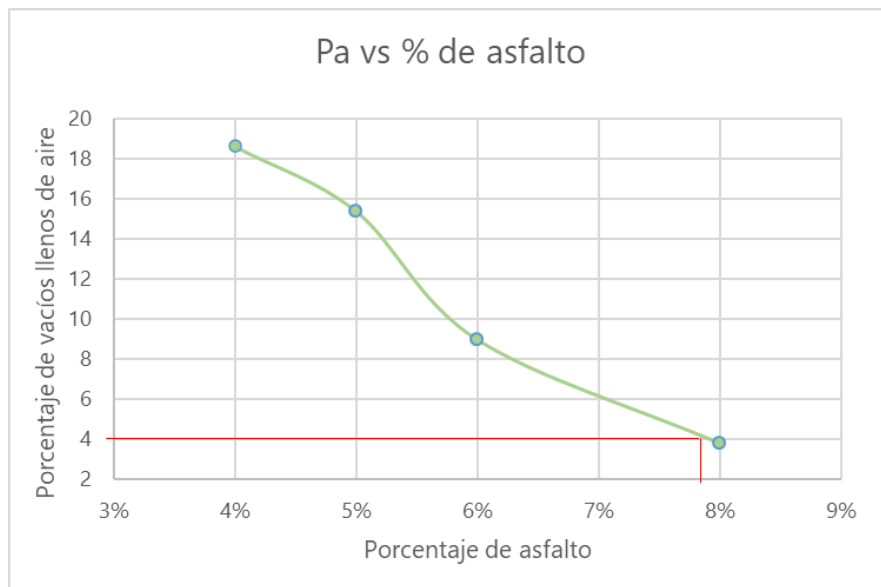


Ilustración 105. Gráfica Pa vs % de asfalto de la mezcla virgen

- Gráfica Gmb vs % de asfalto

Por medio de la gráfica de gravedad específica de las probetas compactadas de agregado virgen, se obtuvo el porcentaje de 6% de asfalto correspondiente al Gmb máximo de las 5 probetas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil.

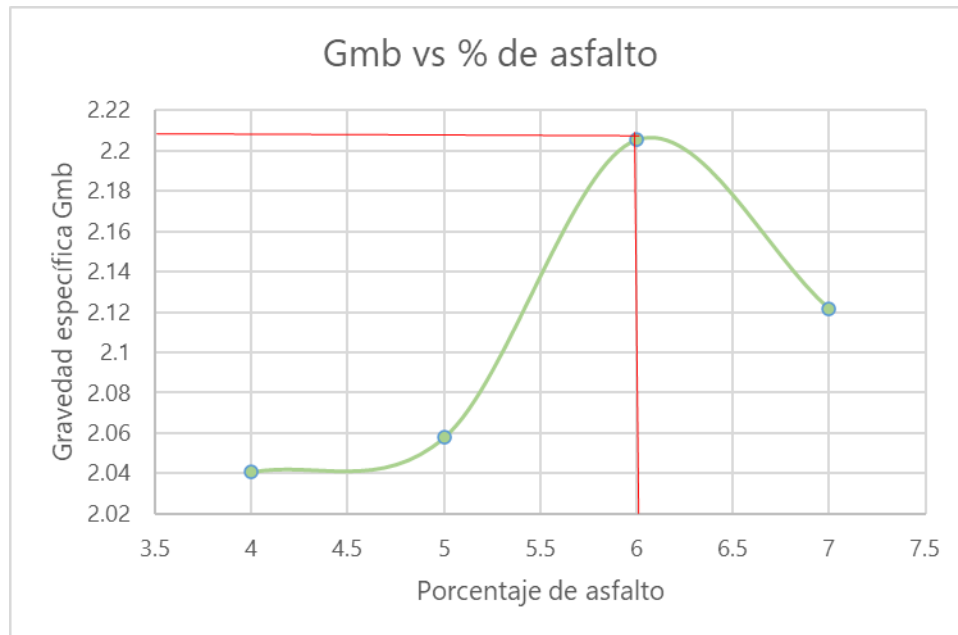


Ilustración 106. Gráfica Gmb vs % de asfalto de la mezcla virgen

- Cálculo de porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla con agregado virgen

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{\%_1 + \%_2 + \%_3}{3}$$

Ecuación 43. Porcentaje óptimo de asfalto

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{5.05 + 7.75 + 6}{3}$$

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = 6.27\%$$

4.5.6.4 Elaboración de probeta de mezcla virgen con asfalto óptimo

Al haber obtenido el porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla virgen, se elaboraron 2 probetas con porcentaje óptimo para determinar las propiedades mecánicas reales de la mezcla de concreto asfáltico y de este modo poder comparar resultados reales y no teóricos, los cuales pueden ser susceptibles a errores.

El procedimiento de elaboración y los cálculos referentes siguen los exactos pasos anteriormente explicados.

- Pesos de los materiales requeridos

Por medio de la tabla a continuación se obtuvieron los pesos requeridos para cada material de la mezcla para una cantidad de 6.27% de asfalto, la cual es el contenido óptimo calculado anteriormente.

Tabla 44. Pesos de materiales requeridos para mezcla virgen con % óptimo

Material	% por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Pesos por material g
Asfalto	6.27	5.90	70.80
Grava	48	45.17	542.02
Arena	48	45.17	542.02
Filler	4	3.76	45.17
Total	106.27	100	1200

$$25\% \text{ retenido } 200 = 11.29g$$

$$75\% \text{ pase } 200 = 33.88g$$

Se utilizaron estos pesos de los materiales para realizar la mezcla virgen de concreto asfáltico, compactar las probetas y someterlas a las pruebas Marshall.

- Datos de mediciones, pesos, estabilidad, y deformación recolectados del ensayo Marshall

Los datos recolectados luego de realizar el ensayo Marshall a las probetas con contenido óptimo de asfalto son los siguientes.

Tabla 45. Dimensiones de probetas de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto

Probeta	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura Promedio (cm)	Volumen (cm ³)
V1	10.135	10.16	10.1475	5.69	5.74	5.72	462.19393
V2	10.13	10.125	10.1275	6.43	6.46	6.45	519.17923

Tabla 46. Pesos de probetas de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto

Probeta	Peso al aire (g)	Peso sumergido (g)
V1	958.20	515.13
V2	1,043.20	541.37

Tabla 47. Carga y deformación de las probetas con % óptimo de asfalto de mezcla virgen

Probeta	Carga (kN)	Carga (lb)	Deformación (mm)	Deformación (0.01 in)
V1	4.54	1020.63	3.19	12.55
V2	3.87	870.01	3.498	13.77

Tabla 48. Datos de peso específico de mezcla virgen con % óptimo de asfalto

Probeta	Masa de asfalto (g)	Peso picnómetro + agua a 600ml	Peso picnómetro + asfalto + agua a 600ml
V1	102.00	953.18	1,011.60
V2	101.64	953.18	1,010.45

- Propiedades mecánicas de la mezcla virgen con % óptimo de asfalto

Se realizaron los cálculos correspondientes de las propiedades mecánicas para las dos probetas de porcentaje óptimo de asfalto por medio de la metodología de cálculo explicada anteriormente en el procedimiento de cálculo de porcentaje óptimo.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos y el promedio para cada propiedad de la mezcla.

Tabla 49. Propiedades mecánicas de una mezcla virgen con % óptimo de asfalto

Características	V1	V2	Promedio
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.163	2.079	2.1207
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.341	2.291	2.3156
Peso específico bulk, Gsb	2.669	2.669	2.6694
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.551	2.489	2.5199
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-1.752	-2.749	-2.2508
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	7.549	8.487	8.018
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	23.765	26.720	25.2424
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	7.600	9.252	8.4262
Estabilidad (kN)	5.40	3.87	4.64
Flujo 0.01 in	12.55	13.77	13.16

4.5.7 ENSAYOS DE LABORATORIO AL RESIDUO DE CONCRETO ASFÁLTICO

Se obtuvieron dos muestras de residuo de concreto asfáltico (RAP) de diferente origen para realizar el procedimiento de reciclaje. Se nombraron la muestras como RAP1 y RAP2, se denominarán de esta manera en los cálculos posteriores.

Se realizaron tres ensayos a ambos residuos de concreto asfáltico los cuales fueron: determinación del porcentaje de asfalto en las mezclas por medio del método A (centrífuga) de la norma ASTM 2172, granulometría del agregado del RAP, y gravedad específica del RAP. Con el propósito de calificar preliminarmente las condiciones y propiedades de los residuos; los resultados obtenidos de los ensayos fueron utilizados en cálculos posteriores.

4.5.7.1 Gravedad específica del RAP

Para el cálculo de gravedad específica del RAP se consideró la muestra como una mezcla suelta de concreto asfáltico. Se realizó el ensayo de gravedad específica a las dos muestras de RAP de la misma manera que fue realizado para la mezcla virgen, así mismo, se realizaron los mismo cálculos.

Los resultados obtenidos luego de realizar los cálculos correspondientes son los siguientes:

Tabla 50. Datos de gravedad específica de RAP1

Datos de gravedad específica de RAP1		(g)
Wm	Peso del material	102.32
Wp+a	Peso de picnómetro + agua	966.8
Wp+a+m	Peso de picnómetro + agua + material	1025.81
Gmm RAP1=		2.363

Tabla 51. Datos de gravedad específica de RAP2

Datos de gravedad específica de RAP2		(g)
Wm	Peso del material	100.11
Wp+a	Peso de picnómetro + agua	966.8
Wp+a+m	Peso de picnómetro + agua + material	1030.52
Gmm RAP2		2.751

4.5.7.2 Contenido de asfalto del RAP

Para obtener el contenido de asfalto de las dos muestras de residuo se requiere de una máquina centrífuga para la extracción del asfalto, la cual el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC no posee, por lo cual se hizo uso de laboratorio privado de la empresa Tecnisa S.A. de C.V.

Se solicitó que se le realizaran dos ensayos a cada una de las muestras para utilizar el promedio de los resultados en los cálculos posteriores de diseño de mezcla reciclada.

Los resultados obtenidos por el laboratorio privado fueron de 5.82% y 5.57% de contenido de asfalto para el RAP1, para el RAP2 fue de 3.72% y 3.48%.

Tabla 52. Contenido de asfalto en RAP1

Porcentaje de asfalto en la mezcla		
Muestra	Ensayo	Resultado %
RAP1	1	5.82
RAP1	2	5.57
Promedio		5.695

Tabla 53. Contenido de asfalto en RAP2

Porcentaje de asfalto en la mezcla		
Muestra	Ensayo	Resultado %
RAP2	1	3.72
RAP2	2	3.48
Promedio		3.6

4.5.7.3 Granulometría del agregado del RAP

La granulometría de las muestras de RAP son las siguientes.

Tabla 54. Porcentajes de pase del agregado de RAP1

Muestra RAP 1						
Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	0	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	101.3	101.3	10.13	10.13	89.87
#4	4.76	204.1	305.4	20.41	30.54	69.46
#8	2.38	186.1	491.5	18.61	49.15	50.85
#50	0.297	321.6	813.1	32.16	81.30	18.70
#200	0.074	105	918.1	10.50	91.80	8.20
Fondo		82	1000.1	8.20	100.00	0.00
Total		1000.1		100.00		

Tabla 55. Porcentajes de pase del agregado de RAP2

Muestra RAP 2						
Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	0	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	180.8	180.8	18.07	18.07	81.93
#4	4.76	342.2	523	34.21	52.28	47.72
#8	2.38	168.1	691.1	16.80	69.09	30.91
#50	0.297	209.1	900.2	20.90	89.99	10.01
#200	0.074	58.4	958.6	5.84	95.83	4.17
Fondo		41.7	1000.3	4.17	100.00	0.00
Total		1000.3		100.00		

4.5.8 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

Se realizó el diseño de mezcla asfáltica por medio del procedimiento propuesto del proyecto de investigación el cual fue creado en base a la metodología "Hot asphalt mixing" implementada por el Departamento de Transporte de Estados Unidos de América.

El procedimiento de diseño utilizado cuenta de 5 pasos los cuales son explicados a continuación para la mezcla con RAP1.

1. Verificación de la granulometría de los agregados y el RAP

El propósito del primer paso de diseño de mezcla reciclada es verificar que la combinación de los agregados vírgenes con los agregados del RAP cumpla con los límites de porcentaje de pase establecidos por la normativa en el diseño de mezcla virgen correspondientes al tamaño máximo nominal de los agregados vírgenes utilizados para ambas mezclas.

- Se definió el porcentaje de RAP a utilizar y se asignó la variable r

Se utilizó un porcentaje de 15% de RAP a utilizar en las mezclas recicladas debido a que el Departamento de Transporte de EE. UU. define que al utilizar más de 20% el procedimiento de diseño aumenta en complejidad.

$$RAP = 15\%$$

$$\text{Nuevo agregado} = 85\%$$

$$r = 85$$

Por medio de los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría del agregado virgen y el RAP se generó la siguiente tabla.

Tabla 56. Porcentajes de pase de RAP1 y de agregado nuevo

Tamiz	Tamaño del Tamiz mm	Porcentaje de pase	
		Agregado RAP	Nuevo agregado
1"	25	100.00	100.00
3/4"	19	100.00	98.17
3/8"	9.5	89.87	66.51
#4	4.75	69.46	50.75
#8	2.36	50.85	46.99
#50	0.3	18.70	12.44
#200	0.075	8.20	3.08

Luego se definió el porcentaje de pase combinado. Este valor se obtuvo al realizar la multiplicación de los porcentajes de pase con el respectivo porcentaje del total de la mezcla a realizar, 15% para el RAP y 85% por el agregado nuevo. Por último, se sumaron ambos porcentajes de pase para así obtener el porcentaje de pase combinado.

Tabla 57. Porcentaje de pase combinado

Tamiz	Tamaño del	Porcentaje de pase		
		15% agregado RAP	85% nuevo agregado	Agregado combinado
1"	25	15.00	85.00	100.00
3/4"	19	15.00	83.44	98.44
3/8"	9.5	13.48	56.53	70.01
#4	4.75	10.42	43.13	53.55
#8	2.36	7.63	39.95	47.57
#50	0.3	2.80	10.57	13.38
#200	0.075	1.23	2.62	3.85

Por último, se verificó que el porcentaje de pase combinado cumpliera con los límites definidos.

Tabla 58. Verificación de cumplimiento de límites de porcentaje de pase combinado

Tamiz	Tamaño del	Porcentaje de pase	
		Límites de % de pase	% de pase combinado
1"	25	100	100.00
3/4"	19	90-100	98.44
3/8"	9.5	56-80	70.01
#4	4.75	35-65	53.55
#8	2.36	23-49	47.57
#50	0.3	5-19	13.38
#200	0.075	2-8	3.85

2. Porcentaje óptimo aproximado de la mezcla

El porcentaje óptimo aproximado de la mezcla reciclada es el porcentaje óptimo calculado anteriormente de la mezcla virgen por medio del método Marshall. Por lo tanto, se utilizó el valor de 6.27% como porcentaje óptimo aproximado para ambas mezclas recicladas.

3. Definición de los porcentajes de asfalto de prueba

Al haber definido el porcentaje óptimo aproximado, se definieron los porcentajes de asfalto de prueba para realizar probetas con cada uno de los porcentajes. Los porcentajes de prueba se eligieron en incrementos y reducciones de 0.5% del porcentaje óptimo aproximado.

Los porcentajes de prueba que se definieron para ambas mezclas son:

- 5%
- 5.5%
- 6%
- 6.5%
- 7%

4. Definición de los porcentajes de los agregados de la mezcla y sus pesos

Por medio de las ecuaciones a continuación, se obtuvieron los porcentajes de los agregados de las mezclas y los pesos de los materiales se calcularon de la misma manera que en la mezcla virgen por medio del método Marshall.

Las ecuaciones fueron simplificadas de modo que quedaran en función de los porcentajes de prueba.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100 * (100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$

Ecuación 44. Porcentaje del nuevo cemento asfáltico

Donde:

P_{nb}: Porcentaje de cemento asfáltico adicional

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

P_{sb}: Contenido de asfalto en el RAP

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - 85 * 5.70)P_b}{100(100 - 5.70)} - \frac{(100 - 85)5.70}{100 - 5.70}$$

$$P_{nb} = 1.0091P_b - 0.907$$

Ecuación 45. Porcentaje de nuevo cemento asfáltico para RAP1

$$P_{sm} = \frac{100(100 - r)}{100 - P_{sb}} - \frac{(100 - r)P_b}{100 - P_{sb}}$$

Ecuación 46. Porcentaje efectivo de RAP en la mezcla total

Donde:

P_{sm}: Porcentaje efectivo de RAP

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

P_{sb}: Contenido de asfalto en el RAP

$$P_{sm} = \frac{100(100 - 85)}{100 - 5.70} - \frac{(100 - 85)P_b}{100 - 5.70}$$

$$P_{sm} = 15.907 - 0.159P_b$$

Ecuación 47. Porcentaje efectivo de RAP1 en la mezcla

$$P_{ns} = r - \frac{rP_b}{100}$$

Ecuación 48. Porcentaje efectivo de nuevo agregado en la mezcla total

Donde:

P_{ns}: Porcentaje efectivo de nuevo agregado

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

$$P_{ns} = 85 - \frac{85P_b}{100}$$

$$P_{ns} = 85 - 0.85P_b$$

Ecuación 49. Porcentaje efectivo de nuevo agregado para RAP1 y RAP2

A continuación, se muestra el desglose de los cálculos realizados para cada porcentaje de asfalto.

Tabla 59. Porcentajes de los agregados de RAP1 para cada porcentaje

Porcentajes de los agregados de las mezcla de concreto asfáltico reciclado RAP1					
Contenido de asfalto, P _b	5	5.5	6	6.5	7
P _{nb} =1.0091P _b -0.907	4.1385	4.64305	5.1476	5.65215	6.1567
P _{sm} =15.907-0.159P _b	15.112	15.0325	14.953	14.8735	14.794
P _{ns} =85-0.85P _b	80.75	80.325	79.9	79.475	79.05
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Al obtener los porcentajes de los agregados se realizó el cálculo de los pesos referentes a los porcentajes obtenidos para cada material. Así mismo, se realizaron los cálculos para obtener la cantidad de grava, arena, y filler, con la misma proporción utilizada en la mezcla virgen de 50-50-4.

Tabla 60. Pesos por material para una mezcla reciclada de 5% de asfalto

5% de asfalto		
Material	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (g)
Asfalto adicional, P _{nb}	4.14	49.66
RAP, P _{sm}	15.11	181.34
Nuevo agregado, P _{ns}	80.75	969.00
Total	100.00	1200.0

Para calcular los pesos de la grava, arena y filler, se utilizó el dato total de P_{ns} de 969.00g como la masa total y se calcularon los pesos de los agregados en base a ese valor.

Tabla 61. Pesos de los nuevos agregados para mezcla reciclada de 5% de asfalto

Nuevo agregado para 5% de asfalto		969 g
Material	% Por peso de la mezcla	Pesos por material (g)
Grava	48	465.12
Arena	48	465.12
Filler	4	38.76
Total	100	969

Por último, se repitió el mismo cálculo para obtener los pesos requeridos de retenido 200 y pase 200 del filler.

Tabla 62. Pesos de filler para una mezcla reciclada de 5% de asfalto

Filler para 5% de asfalto		38.76 g
Tamiz	% Por peso de la mezcla	Peso por material (g)
Retenido 200	25	9.69
Pase 200	75	29.07
Total	100	38.76

Se realizó el mismo procedimiento para los demás porcentajes de asfalto.

5. Determinación del porcentaje óptimo de asfalto

Por medio de los datos obtenidos de peso de los materiales en el paso 4, se realizaron 5 probetas en el laboratorio de Ingeniería Civil para cada una de las mezclas con RAP1 y RAP2, con un total de 10 probetas realizadas para definir el porcentaje óptimo de asfalto para ambas mezclas.



Ilustración 107. Probetas de concreto asfáltico reciclado RAP1



Ilustración 108. Probetas de concreto asfáltico reciclado RAP2

Los datos registrados al realizar el método Marshall son los siguientes.

Tabla 63. Dimensiones de probetas de mezcla con RAP1

Porcentaje	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro Promedio (cm)	Altura 1 (cm)	Altura 2 (cm)	Altura Promedio (cm)	Volumen (cm ³)
5%	10.18	10.16	10.17	6.53	6.55	6.54	531.26
5.5%	10.15	10.15	10.15	5.99	6.06	6.03	487.50
6%	10.17	10.14	10.155	6.34	6.30	6.32	511.88
6.5%	10.14	10.17	10.16	5.69	5.75	5.72	463.28
7%	10.16	10.14	10.15	6.30	6.30	6.30	509.76

Tabla 64. Pesos de probetas con RAP1

Porcentaje	Peso al aire (g)	Peso sumergido (g)
5%	1,067.59	549.12
5.5%	927.74	475.67
6%	983.94	509.53
6.5%	906.80	469.69
7%	1035.26	535.80

Tabla 65. Carga y deformación de probetas con RAP1

Porcentaje	Carga (kN)	Carga (lb)	Deformación (mm)	Deformación (0.01 pulg)
5%	4.68	1052.11	4.336	17.07
5.5%	1.85	415.9	5.035	19.82
6%	2.6	584.5	5.201	20.47
6.5%	3.32	746.37	6.75	26.57
7%	5.25	1180.25	5.293	20.84

Tabla 66. Datos de peso específico de mezcla con RAP1

Porcentaje	Masa de asfalto (g)	Peso picnómetro + agua a 600ml	Peso picnómetro + asfalto + agua a 600ml
5%	90.49	966.80	1,020.44
5.5%	101.44	966.80	1,025.88
6%	101.13	966.80	1,024.14
6.5%	100.49	966.80	1,019.97
7%	100.38	966.80	1,019.51

Con estos datos se realizaron los 12 pasos de cálculos para encontrar el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla con RAP1, de la misma manera que se realizó para la mezcla virgen.

Para el cálculo de peso específico bulk (Gsb) se modificó la ecuación para incorporar el dato de gravedad específica del RAP1.

$$Gsb = \left[\frac{P1 + P2 + P3 + P4}{\left(\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4} \right)} \right]$$

Ecuación 50. Peso específico bulk Gsb para mezcla con RAP

Donde:

P4: Porcentaje por peso de la mezcla del RAP

G4: Gravedad específica del RAP

Los resultados obtenidos para la mezcla con RAP1 son los siguientes:

Tabla 67. Propiedades mecánicas de las probetas con RAP1

Propiedades	5%	5.5%	6%	6.5%	7%
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.059	2.052	2.074	2.074	2.072
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.456	2.395	2.309	2.123	2.106
Peso específico bulk, Gsb	2.615	2.615	2.615	2.615	2.615
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.617	2.565	2.483	2.274	2.267
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	0.030	-0.744	-2.060	-5.802	-5.930
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	4.110	5.350	7.104	11.124	11.725
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	24.528	25.173	24.782	25.160	25.629
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	16.147	14.302	10.193	2.311	1.565
Estabilidad (kN)	4.493	2.016	2.600	3.951	5.250
Flujo 0.01 in	17.07	19.82	20.47	26.57	20.84

Con los datos obtenidos se realizaron las tres gráficas necesarias para obtener el porcentaje óptimo de asfalto de la mezcla con RAP1.

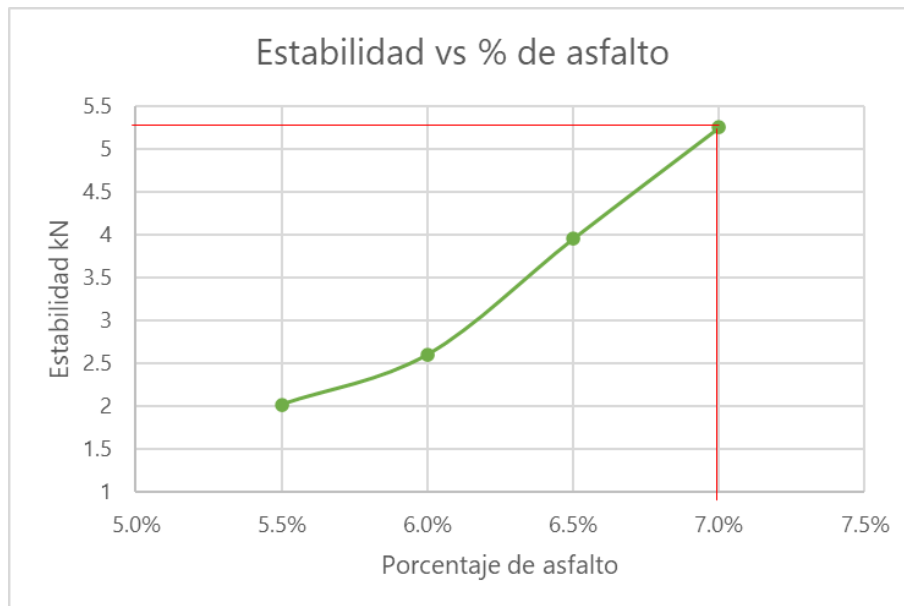


Ilustración 109. Gráfica de estabilidad vs % de asfalto de la mezcla con RAP1

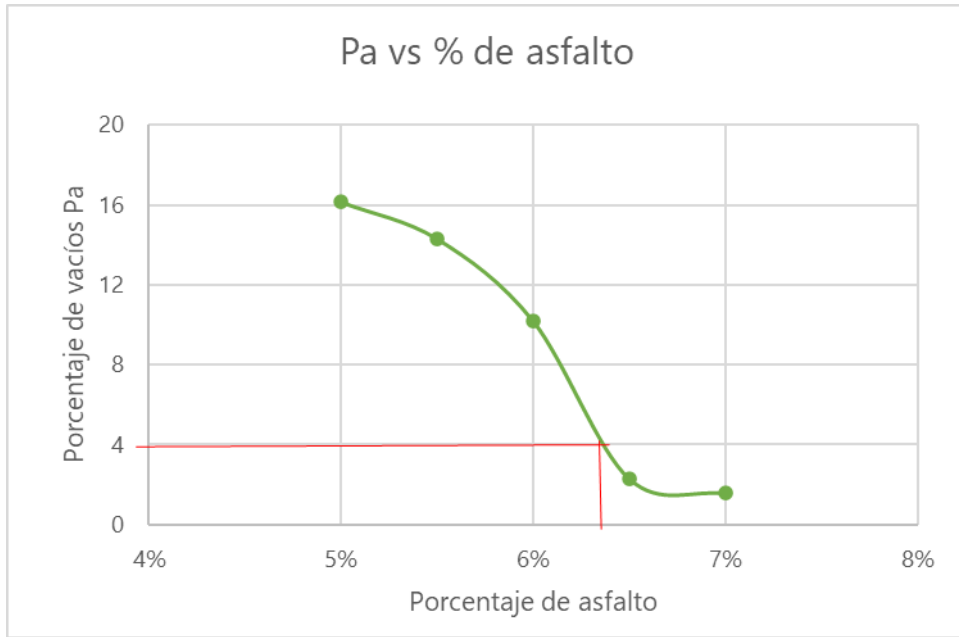


Ilustración 110. Gráfica de porcentaje de vacíos vs % de asfalto de mezcla con RAP1

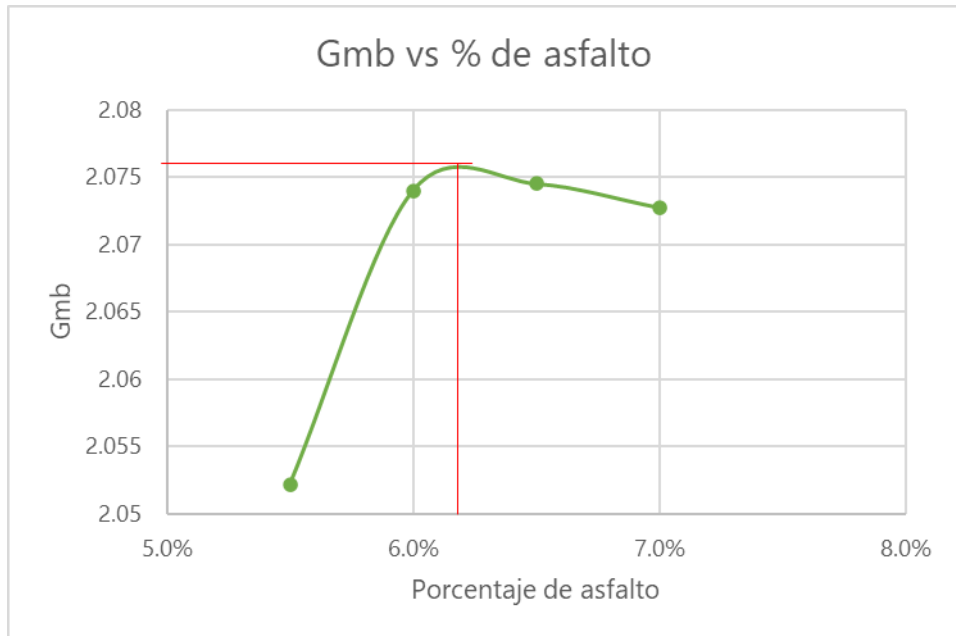


Ilustración 111. Gráfica Gmb vs % de asfalto de mezcla con RAP1

Los porcentajes de asfalto obtenidos por las gráficas son de 7%, 6.45%, y 6.2% correspondientemente, Se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla con RAP1 de 6.55%. Se realizó el mismo procedimiento de cálculo para la mezcla con RAP 2 y se obtuvo un porcentaje óptimo de asfalto de 6.87%.

4.5.8.1 Elaboración de probetas de asfalto óptimo con RAP

Al conocer el porcentaje óptimo de asfalto requerido para las dos muestras, se elaboraron dos probetas para cada mezcla en el laboratorio por medio del procedimiento Marshall.

Registrados los datos generados por la prueba de estabilidad realizados con la máquina estabilizadora Marshall, los pesos y dimensiones correspondientes a las probetas, y los datos obtenidos al realizar el ensayo de peso específico a las mezclas sueltas, se procedió a realizar los cálculos para determinar las propiedades mecánicas de las probetas y las mezclas. Los cálculos obtenidos son el promedio de los resultados de cada una de las probetas.

A continuación, se presentan las propiedades promedio obtenidos para las mezclas con porcentaje óptimo de asfalto de concreto asfáltico reciclado con RAP1 y con RAP2.

Tabla 68. Propiedades de las mezclas recicladas con porcentaje óptimo

Propiedades	Óptima RAP1	Óptima RAP 2
Porcentaje de asfalto	6.55%	6.87%
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.106	2.18
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.267	2.364
Peso específico bulk, Gsb	2.615	2.682
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.452	2.52
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-2.581	-2.41
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	8.137	8.298
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	24.080	23.581
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	7.118	5.66
Estabilidad (Ib)	966.68	861.08
Flujo 0.01 in	14.52	17.91

V RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar los ensayos de laboratorio correspondientes para las variables de investigación

5.1 CALIFICACIÓN DE LOS AGREGADOS VÍRGENES

En la siguiente sección, se muestran los resultados de los ensayos realizados a los agregados vírgenes utilizados para las mezclas de concreto asfáltico, los cuales son el cemento asfáltico, el agregado grueso y el agregado fino.

5.1.1 CALIFICACIÓN DEL CEMENTO ASFÁLTICO

Para calificar el cemento asfáltico PG 76-22 se realizaron los ensayos de punto de encendido e ignición, ductilidad, y grado de penetración. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la calificación del cemento asfáltico.

5.1.1.1 Punto de encendido e ignición

Tabla 69. Resultados punto de encendido e inflamación

Punto de encendido	Punto de inflamación
285°C	329°C

5.1.1.2 Ductilidad

Tabla 70. Resultados de ductilidad

Número de briqueta	Lectura	Unidad
1	15	Centímetros
2	16	Centímetros
3	21	Centímetros
Promedio	17.33	Centímetros

5.1.1.3 Grado de penetración

Tabla 71. Resultados de penetración

Número de ensayo	Lectura (0.01 mm)	Incluido o descartado
1	15	Descartado
2	35	Incluido
3	31	Descartado
4	39	Incluido
5	39	Incluido
6	42	Incluido
7	34	Incluido
Promedio	37.8	

A partir de la siguiente tabla se puede determinar qué tipo de cemento asfáltico es el que se está utilizando, la tabla se muestra a continuación:

Tabla 72. Especificaciones para betunes asfálticos

Características	Metodo de Ensayo AASHO	Metodo de Ensayo ASTM	Tipos				
			Industriales y especiales	Pavimentacion			
Penetración 25 ° C, 100 gr. 5 seg	T-49	D-5	40-50	60-70	85-100	120-150	200-300
Viscosidad a 135 ° C.							
Sayboat - Furol , SSF	-----	E-102	120+	100+	85+	70+	50+
Cinematica , centistokes	-----	D-445	240+	200+	170+	140+	100+
Punto de Inflamcion(vaso abierto Cleveland), °C	T-48	D-92	232+	232+	232+	232+	177+
Ensayo en horno en pelicula delgada.	T-179	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Penetracion despues del ensayo, 25 °C, 100 gr .5 seg ., % de la original.	T-49	D-5	52+	50+	45+	42+	37+
Ductilidad							
A 25° C, cms	T-51	D-113	100+	100+	100+	60+	-----
A 15.6° C, cms	-----	-----	-----	-----	-----	-----	60+
Solubilidad en C Cl4, %	T-44 *	D-4*	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+	99.5+
Condiciones Generales			El asfalto se preparará por destilacion del petroleo .Sera uniforme en su naturaleza y o formará espuma al calentarlo a 177° C.				
* Salvo que se emplea tetracloruro de carono como disolvente en lugar de sulfuro de carbono , el procedimiento n° 1 del metodo AASHO T-44 o el n° 1 del metodo ASTM D-4							

El primer resultado que se obtuvo fue el de punto de encendido, que en la tabla aparece como punto de inflamación, luego de realizar el ensayo de punto de inflamación del cemento asfáltico, el resultado obtenido fue de 329 grados centígrados.

Los otros dos ensayos que se realizaron fueron los ensayos de penetración y ductilidad, los cuales a través de estos dos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados. Para el ensayo de penetración se obtuvo un resultado de 37.8, que fue el promedio de todos los ensayos realizados, y en el ensayo de ductilidad el resultado fue de 17.33 centímetros, que esta fue la longitud promedio a la cual la briqueta se rompió.

Al analizar estos resultados con la tabla, el cemento asfáltico utilizado se asemeja a un cemento asfáltico de tipo industrial y especial. Como se mencionó previamente, el cemento asfáltico utilizado es un asfalto modificado, por lo cual se puede considerar un cemento asfáltico especial ya que no es un asfalto convencional que se utiliza normalmente en las pavimentaciones.

Se investigó las características del asfalto PG 76-22, para poder comparar los resultados obtenidos de los ensayos, con las características de este cemento asfáltico, a continuación, se muestra la tabla de características:

Tabla 73. Características del asfalto PG 76-22

Características del Cemento asfáltico: ORIGINAL	Valores de Referencia SCT	NORMATIVIDAD N.CMT.4.05.002/06
Viscosidad Rotacional Brookfield a 135 °C, Pa s, max.	4	ASTM D4402/13
Penetración a 25 °C, 100 g, 5 s; 1/10 mm, min.	40	M.MMP4.05.006/00
Penetración a 4 °C, 200 g, 60 s; 1/10 mm, min.	25	M.MMP4.05.006/00
Punto de Inflamación Cleveland, °C, min.	230	M.MMP4.05.007/00
Punto de Reblandecimiento; °C, min.	55	M.MMP4.05.009/00
Recuperación elástica por torsión a 25°C; %, min.	35	M.MMP4.05.024/00
Resiliencia a 25°C; 1/100 mm, min.	20	M.MMP4.05.023/00

Fuente: (Impulsora De Asfaltos S.A. De C.V.)

En la tabla de características aparecen los valores de penetración y punto de inflamación de este tipo de asfalto. El resultado obtenido de punto de inflamación cumple con la característica, ya que este valor es mayor que el valor que aparece en la tabla. Para la penetración se tuvo un resultado de 37.8, que está por debajo del valor de la tabla, pero no es un resultado que se aleja de este valor, al comparar estos valores con las características se puede afirmar que se está trabajando con un cemento asfáltico modificado PG 76-22.

5.1.2 CALIFICACIÓN DEL AGREGADO FINO

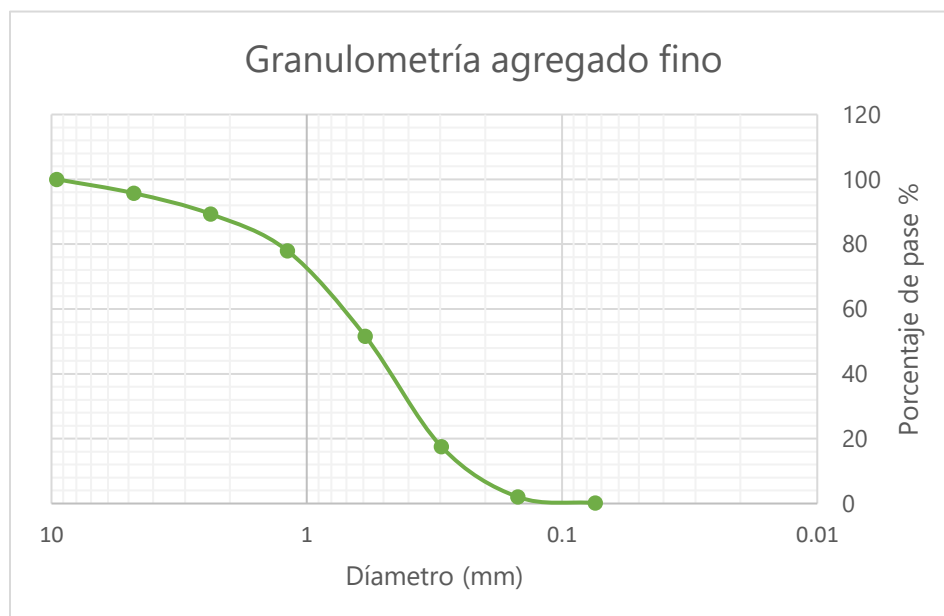
Para evaluar la arena utilizada se realizaron los ensayos de granulometría y peso específico. Los resultados fueron utilizados para cálculos posteriores en los diseños de mezcla y determinación de porcentaje óptimo de asfalto.

5.1.2.1 Granulometría de agregado fino

Tabla 74. Resultado granulometría agregado fino

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
3/8"	9.52	0	0	0	0	100
#4	4.76	21.4	21.4	4.27	4.27	95.73
#8	2.38	32.2	53.6	6.43	10.71	89.29
#16	1.19	56.7	110.3	11.32	22.03	77.97
#30	0.59	131.9	242.2	26.34	48.37	51.63
#50	0.297	170.5	412.7	34.05	82.42	17.58
#100	0.149	77.8	490.5	15.54	97.96	2.04
#200	0.074	9.4	499.9	1.88	99.84	0.16
Fondo		0.8	500.7	0.16	100.00	0.00
Total		500.7		100.00		

Tabla 75. Resultado curva granulométrica del agregado fino



5.1.2.2 *Peso específico del agregado fino*

Tabla 76. Resultados de peso específico del agregado fino

Dato	Valor
Peso específico Bulk	2.580
Peso específico Bulk saturado con superficie seca	2.646
Peso específico aparente	2.760
Absorción (%)	2.522

5.1.3 CALIFICACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Para evaluar la grava utilizada se realizaron los ensayos de granulometría y peso específico. Los resultados obtenidos son los siguientes.

5.1.3.1 *Granulometría del agregado grueso*

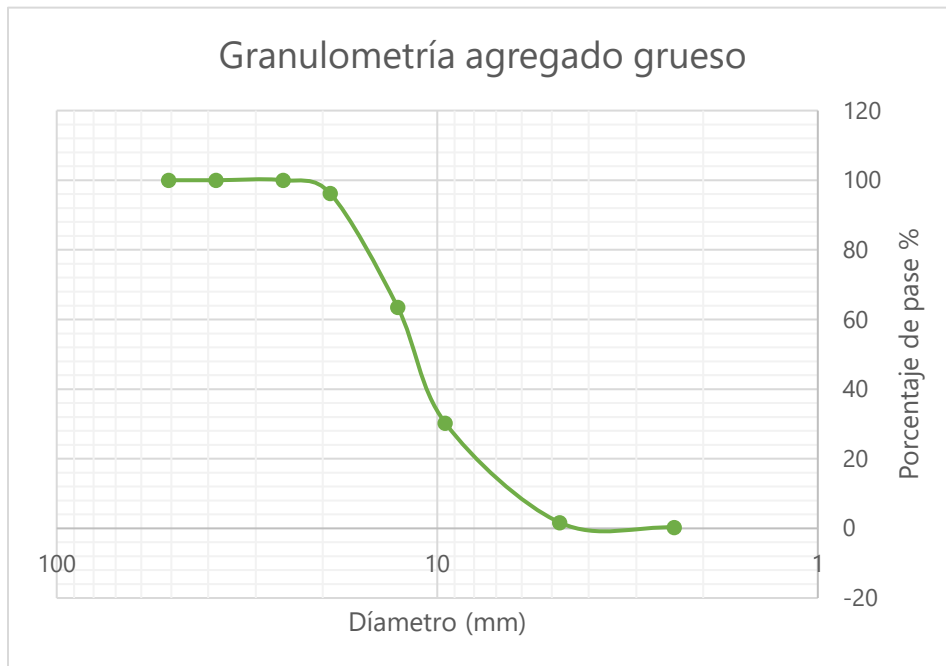
Tabla 77. Resultados granulometría agregado grueso

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
2"	50.8	0	0	0	0	100
1 1/2"	38.1	0	0	0	0	100
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	114.5	114.5	3.81	3.81	96.19
1/2"	12.7	981.8	1096.3	32.71	36.52	63.48
3/8"	9.52	998.1	2094.4	33.25	69.77	30.23
#4	4.76	857.5	2951.9	28.57	98.34	1.66
#8	2.38	41.6	2993.5	1.39	99.72	0.28
Fondo		8.3	3001.8	0.28	100.00	0.00
Total		3001.8		100.00		

Al analizar la tabla de la granulometría gruesa se obtuvo el tamaño máximo nominal del agregado grueso al ser utilizado en el diseño de la mezcla, para determinar el tamaño máximo nominal se necesita analizar la columna del porcentaje retenido. Para poder obtener el tamaño máximo nominal se tiene que observar cual es el tamiz de mayor abertura que retiene no más de un 10%

de las partículas más gruesa, por lo tanto, al analizar la columna de porcentaje retenido se observa que el tamiz con mayor abertura que retiene menos del 10% de las partículas es el tamiz de 3/4 de pulgadas, el cual será el tamaño máximo nominal para el diseño de las mezclas de concreto asfáltico.

Tabla 78. Resultado curva granulométrica agregado grueso



5.1.3.2 Peso específico del agregado grueso

Tabla 79. Resultados de peso específico del agregado grueso

Dato	Valor
Peso específico Bulk	2.767
Peso específico saturado con superficie seca	2.779
Peso específico aparente	2.802
Absorción (%)	0.462

5.2 PROPIEDADES DE PROBETAS DE CONCRETO ASFÁLTICO VIRGEN CON PORCENTAJE ÓPTIMO

% óptimo de asfalto de mezcla virgen = 6.27%

Tabla 80. Resultados de propiedades de una mezcla de concreto asfáltico virgen

Características	V1	V2	Promedio
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.163	2.079	2.1207
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.341	2.291	2.3156
Peso específico bulk, Gsb	2.669	2.669	2.6694
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.551	2.489	2.5199
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-1.752	-2.749	-2.2508
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	7.549	8.487	8.018
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	23.765	26.720	25.2424
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	7.600	9.252	8.4262
Estabilidad (kN)	5.40	3.87	4.64
Flujo 0.01 in	12.55	13.77	13.16

5.3 CALIFICACIÓN DEL CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

5.3.1 CONTENIDO DE ASFALTO EN RAP1

Tabla 81. Contenido promedio de asfalto en muestra RAP1

Porcentaje de asfalto en la mezcla		
Muestra	Ensayo	Resultado %
RAP1	1	5.82
RAP1	2	5.57
Promedio		5.695

5.3.2 CONTENIDO DE ASFALTO EN RAP2

Tabla 82. Contenido promedio de asfalto en muestra RAP2

Porcentaje de asfalto en la mezcla		
Muestra	Ensayo	Resultado %
RAP2	1	3.72
RAP2	2	3.48
Promedio		3.6

5.3.3 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO RAP1

Tabla 83. Resultado granulometría de muestra 1

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	0	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	101.3	101.3	10.13	10.13	89.87
#4	4.76	204.1	305.4	20.41	30.54	69.46
#8	2.38	186.1	491.5	18.61	49.15	50.85
#50	0.297	321.6	813.1	32.16	81.30	18.70
#200	0.074	105	918.1	10.50	91.80	8.20
Fondo		82	1000.1	8.20	100.00	0.00
Total		1000.1		100.00		

5.3.4 GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO RAP2

Tabla 84. Resultado granulometría de muestra 2

Tamiz	D (mm)	Masa Retenida (g)	Masa Retenida Acumulada (g)	% Retenido	%Retenido Acumulado	%Pase
1"	25.4	0	0	0	0	100
3/4"	19.1	0	0	0.00	0.00	100.00
3/8"	9.52	180.8	180.8	18.07	18.07	81.93
#4	4.76	342.2	523	34.21	52.28	47.72
#8	2.38	168.1	691.1	16.80	69.09	30.91
#50	0.297	209.1	900.2	20.90	89.99	10.01
#200	0.074	58.4	958.6	5.84	95.83	4.17
Fondo		41.7	1000.3	4.17	100.00	0.00
Total		1000.3		100.00		

5.3.5 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE RAP1

$$\text{Gravedad específica Gmm de RAP1} = 2.363$$

5.3.6 GRAVEDAD ESPECÍFICA DE RAP2

$$\text{Gravedad específica Gmm de RAP2} = 2.751$$

5.4 PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS CON % ÓPTIMO DE ASFALTO Y RAP

Se obtuvo un 6.55% de porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla con RAP1.

$$\% \text{ óptimo de asfalto de mezcla con RAP1} = 6.55\%$$

Se obtuvo un 6.87% de porcentaje óptimo de asfalto para la mezcla con RAP2.

$$\% \text{ óptimo de asfalto de mezcla con RAP2} = 6.87\%$$

Tabla 85. Resultados de propiedades de mezclas de % óptimo de asfalto con RAP

Propiedades	Óptima RAP1	Óptima RAP 2
Porcentaje de asfalto	6.55%	6.87%
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.106	2.18
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.267	2.364
Peso específico bulk, Gsb	2.615	2.682
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.452	2.52
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-2.581	-2.41
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	8.137	8.298
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	24.080	23.581
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	7.118	5.66
Estabilidad (Ib)	966.68	861.08
Flujo 0.01 in	14.52	17.91

5.5 RESULTADOS DE PROPIEDADES DE LAS TRES MEZCLAS DISEÑADAS

Tabla 86. Resultados de propiedades de las mezclas diseñadas

Propiedades	Óptima virgen	Óptima RAP1	Óptima RAP 2
Porcentaje de asfalto	6.27%	6.55%	6.87%
Gravedad específica de pastillas compactadas, Gmb	2.121	2.106	2.18
Gravedad específica de muestra suelta, Gmm	2.316	2.267	2.364
Peso específico bulk, Gsb	2.669	2.615	2.682
Peso específico de la muestra suelta, Gse	2.520	2.452	2.52
Asfalto absorbido por el agregado, Pba	-2.251	-2.581	-2.41
Contenido efectivo de asfalto en la mezcla, Pbe	8.018	8.137	8.298
Porcentaje de vacíos de agregado mineral, VMA	25.242	24.080	23.581
Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada, Pa	8.426	7.118	5.66
Estabilidad (lb)	1043.00	966.68	861.08
Flujo 0.01 in	13.16	14.52	17.91

Por medio de la tabla de propiedades obtenidas para las tres mezclas de concreto asfáltico, se puede observar que las mezclas varían entre sí. Lo que se puede interpretar, que la incorporación de RAP a una mezcla virgen provoca que se alteren sus propiedades. Así mismo, se puede observar una tendencia de cambio en las propiedades de porcentajes de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa), estabilidad y flujo. Las cuales son propiedades utilizadas en los criterios del Instituto del Asfalto para la utilización en carpeta y base según el tipo de tránsito.

Tabla 87. Criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A.) para el diseño de Marshall

Criterios para Mezcla del Metodo Marshall	Transito Liviano Carpeta y Base		Transito Mediano Carpeta y Base		Transito Pesado Carpeta y Base	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Compactacion, numero de golpes en cada cara de la probeta		35		50		75
Estabilidad, N (lb.)	3336 (750)	—	5338 (1200)	—	8006 (1800)	—
Flujo, 0.25 mm (0.01 pulgadas)	8	18	8	16	8	14
Porcentaje de Vacios	3	5	3	5	3	5
Porcentaje de Vacios en el Agregado Mineral (VMA)	Ver Figura 3.20					
Porcentaje de Vacios llenos de Asfalto (VFA)	70	80	65	78	65	75

Por medio de los resultados obtenidos de estabilidad para la mezcla virgen de 1,043 lb, 966.68 lb para la mezcla con RAP1, y 861.08 lb para la mezcla con RAP2, las tres mezclas se pueden calificar según los criterios del Instituto del Asfalto para el diseño de Marshall. Al observar los rangos de estabilidad para los distintos tipos de tránsitos, se identifica que todas las muestras cumplen para usarse en carpeta de rodadura de tránsito liviano. Así mismo, los resultados de flujo para la mezcla virgen de 13.16 (0.01 in), de 14.52 (0.01 in) para la mezcla con RAP1 y de 17.91 (0.01 in) para la mezcla con RAP2, también cumplen con los criterios de carpeta asfáltica para tránsito liviano.

Se puede concluir que la mezcla virgen tuvo un mejor resultado. Esto porque la mezcla virgen obtuvo la mayor estabilidad y menor deformación, sin embargo, al analizar las tres mezclas asfálticas y clasificar el tipo de tránsito que pueden ser utilizadas, las mezclas con material reciclado, a pesar de sufrir una disminución, cumplen los requisitos para ser utilizadas en carpetas de tránsito liviano.

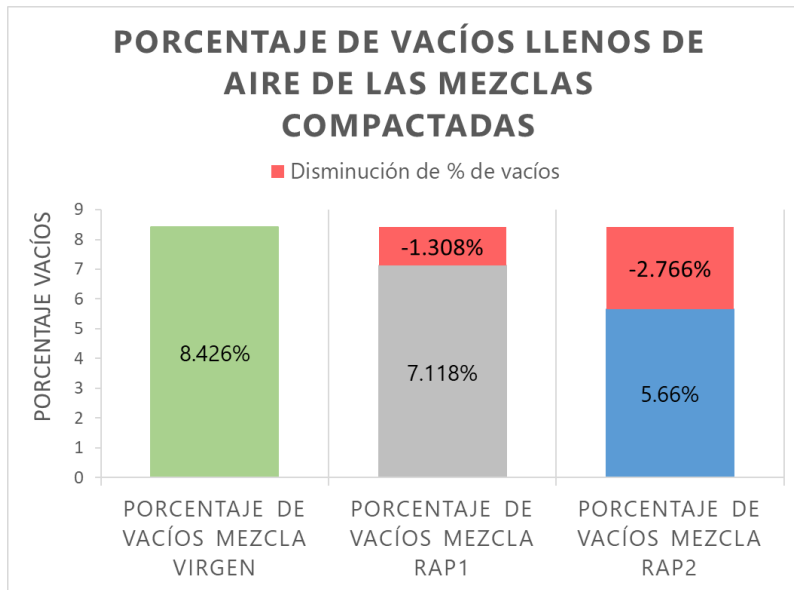


Ilustración 112. Porcentaje de Vacíos Llenos de aire de la mezcla compactada

Por medio del gráfico de porcentaje de vacíos llenos de aire de las mezclas compactadas, se puede observar una disminución de 1.308% para la mezcla con RAP1 y de 2.766% para la mezcla con RAP2, en comparación a la mezcla virgen. Esto demuestra que la incorporación de RAP a una mezcla virgen reduce el porcentaje de vacíos, lo que causa que la mezcla sea más densa. Lo que sugiere que la mezcla con RAP2 tendría el mejor desempeño, ya que los porcentajes de vacíos elevados ocasionan desprendimientos de los agregados y endurecimiento prematuro.

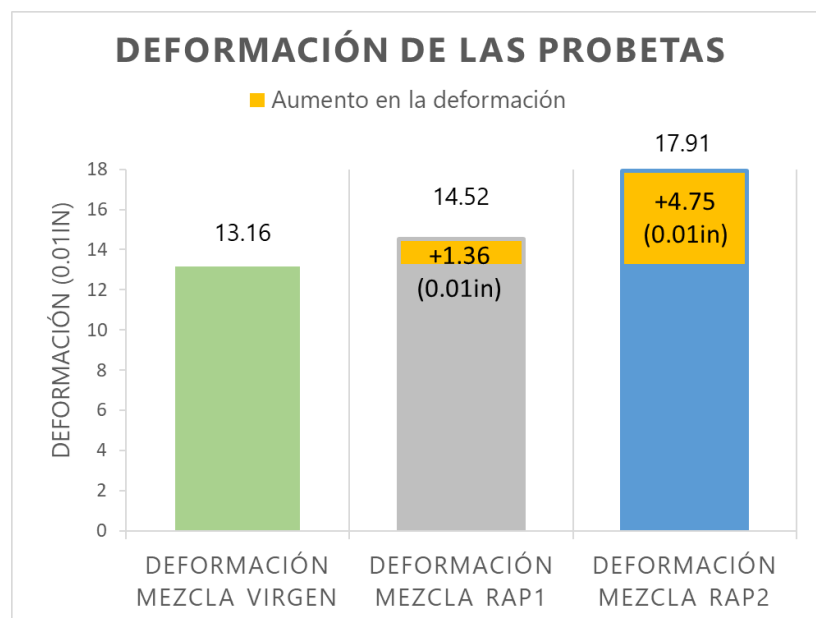


Ilustración 113. Gráfica de Deformación

Se puede observar en la gráfica que las mezclas con RAP1 y RAP2, sufren incrementos en la deformación al haber sido sometidas a la máquina de estabilidad Marshall en comparación a la mezcla virgen. Lo que significa que, al implementar RAP a una mezcla virgen, aumenta su flujo lo que causa un aumento en la deformación de la carpeta de rodadura. En este caso es un resultado desfavorable, ya que las mezclas diseñadas con RAP poseen una deformación elevada, sin embargo, en una mezcla con deformaciones bajas el RAP sería de provecho ya que ayudaría a aumentar en cierta cantidad la deformación mejorando el desempeño de estas, ya que una deformación baja no es favorable en una mezcla para carpeta de rodadura.

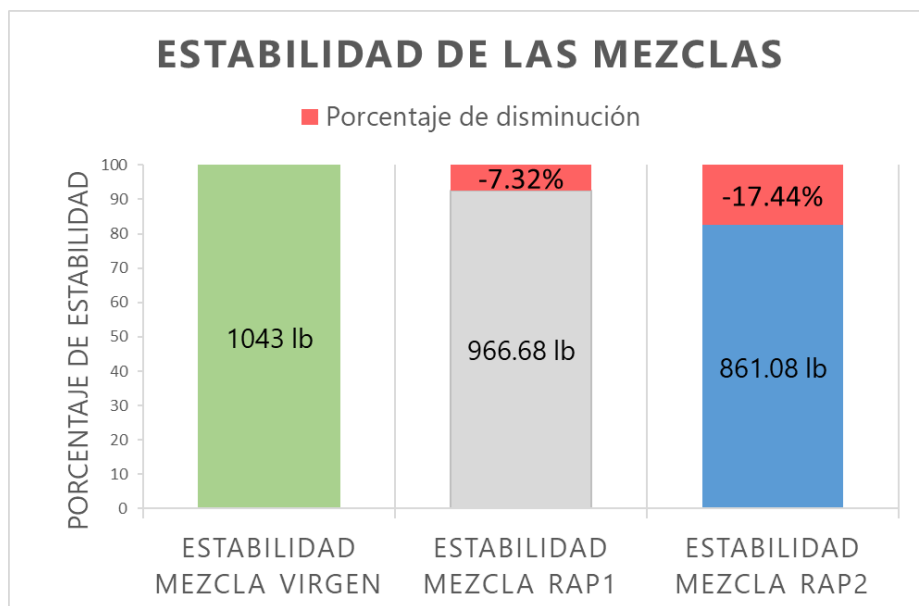


Ilustración 114. Gráfica de Estabilidad

Se puede observar cómo los resultados de estabilidad de las mezclas de concreto asfáltico disminuyeron con la incorporación de RAP. Lo que indica que el RAP afecta la resistencia máxima de una mezcla, disminuyendo su capacidad de carga al momento de estar en servicio. Estos resultados se relacionan con los obtenidos de deformación, los cuales indican que la mezcla virgen es la que sufrió menos deformación y la mezcla con RAP2 es la más deformable.

VI CONCLUSIONES

Según el procedimiento establecido en esta investigación, el cual se refleja en la guía "Procedimiento estándar de diseño para una mezcla de concreto asfáltico reciclado con un porcentaje de 5% a 15% de RAP" (Anexo 15), los resultados obtenidos de las mezclas RAP1, RAP2 y virgen cumplen los parámetros de estabilidad y flujo para ser usados en carpetas de tránsito liviano, así mismo, el porcentaje de vacíos llenos de aire mejoraron con la incorporación de RAP a la mezcla. En conclusión, el procedimiento de reciclaje cumple el propósito de diseñar una mezcla asfáltica reciclada para usarse en carpeta de pavimento flexible.

1. La deposición en botaderos municipales es el destino más común del concreto asfáltico demolido en Honduras, sin embargo, las empresas tienden cada vez más a reutilizar este residuo como capas de subbase o base de las carpetas de rodadura. Esta práctica se ha observado en la carretera Juticalpa – Catacamas y en la ampliación de la CA-5. Así mismo, de las entrevistas realizadas, resultó que en la pavimentación de la carretera Tegucigalpa – Danlí, la carpeta demolida fue reutilizada en la nueva mezcla asfáltica. En conclusión, existe la posibilidad de implementar el reciclaje de concreto asfáltico para disminuir el desperdicio en los botaderos municipales o derecho de vía de las carreteras.
2. El reglamento de residuos sólidos de Honduras clasifica el residuo de concreto asfáltico demolido como un residuo sólido inerte, el cual debe ser depositado en botaderos asignados por las municipalidades y se aplican multas por depositarlo en botaderos clandestinos. Otra consideración del reglamento es que exonera a las empresas constructoras del pago de Impuesto sobre Ventas y deducciones del Impuesto sobre la Renta, por la compra de maquinaria para reciclaje e implementación del reciclaje en obras de construcción, de donde se puede deducir que en Honduras no es obligatorio el reciclaje de residuo de concreto asfáltico demolido, pero sí incentivado.
3. En Estados Unidos de América la Administración General de Carreteras del Departamento de Transporte utiliza el procedimiento de reciclaje de concreto asfáltico demolido llamado "Hot Mix Asphalt Recycling", diseñado por el Instituto del Asfalto y utilizado en 45 estados del país para la construcción de carreteras estatales, con resultados satisfactorios debido a más de 40 años de estudios, lo que sugiere que el reciclaje de carpeta asfáltica demolida puede ser

reutilizada en mezclas asfálticas para carpeta de rodadura de carreteras y que la implementación de esta técnica en Honduras se puede llevar a cabo, por lo que es importante promover que el uso de residuo de concreto asfáltico sea obligatorio.

4. Se ha determinado, por medio de las normas ASTM D2172 para contenido de asfalto de una muestra; ASTM D422 para el ensayo de granulometría y ASTM C127 para el ensayo de gravedad específica, que el contenido promedio de asfalto para la muestra de RAP1 es de 5.695% y de 3.6% para la muestra de RAP2, lo que indica que, entre las dos muestras, la segunda necesita más asfalto virgen en la mezcla. Así mismo, la gravedad específica de la muestra de RAP1 es de 2.363 y 2.751 para RAP2, lo que indica que el RAP2 es un material de mayor densidad. Por último, por medio del ensayo de granulometría, se determinó que el tamaño máximo de las partículas de $\frac{3}{4}$ " y el porcentaje de pase de ambas muestras cumplen con los requisitos establecidos por la norma ASTM D1559 para el uso en el diseño de mezcla por método Marshall.
5. Se ha obtenido una estabilidad de 966.68 lb para la probeta para RAP1 y 861.08 lb para RAP2, con una disminución de 7% y 17% respectivamente, comparados con la mezcla virgen, lo que indica que el RAP1 sufriría menor deformación. Así mismo, han resultado porcentajes de vacíos llenos de aire (Pa) de 7.118% para RAP1 y 5.66% para RAP2, comparado con el 8.426% de la mezcla virgen, de donde se puede deducir que el RAP2 tendría mejor desempeño como carpeta de rodadura, ya que los altos porcentajes de vacíos ocasionan endurecimiento prematuro y desprendimientos de los agregados. Por último, el flujo o deformación de la mezcla con RAP 1 resultó de 14.52 (0.01in) y 17.91 para la mezcla con RAP2, lo que coincide con los resultados de estabilidad, donde la mezcla con RAP1 presenta una diferencia significativa con respecto al RAP2 y a la vez menor si se compara con los 13.16 (0.01in) de la mezcla virgen, de donde se confirma que la mezcla con RAP1 posee mejores propiedades de estabilidad y flujo que la mezcla con RAP2.

VII RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar la mezcla con RAP 1 para su uso en carpeta de rodadura debido a los resultados obtenidos de estabilidad y flujo, a pesar de que ambas mezclas con RAP cumplen los requisitos para su uso en carpeta de rodadura de tránsito liviano.
2. Realizar una investigación utilizando el concreto asfáltico reciclado, para una aplicación distinta a la pavimentación, de esta manera se podrá tener más opciones para poder reciclar el concreto asfáltico y reducir al máximo el desecho de este desperdicio en el país.
3. Realizar el mismo proceso de investigación con la metodología de reciclaje de Superpave para diseño de mezcla y comparar los resultados obtenidos con los de esta investigación, con el propósito de ampliar el análisis de resultados y mejorar el procedimiento realizado de reciclaje de concreto asfáltico.
4. Para investigaciones futuras utilizar concreto asfáltico reciclado de distintos sitios del país, no solamente de Tegucigalpa, por ejemplo, conseguir muestras de RAP de San Pedro Sula, Comayagua, Choluteca, etc., y comparar los resultados finales para poder tener un análisis si el origen de las muestras tiene un impacto en los resultados finales de la mezcla reciclada.
5. En investigaciones futuras referentes al tema de investigación de concreto asfáltico reciclado, se recomienda utilizar diferentes cementos asfálticos, como por ejemplo un asfalto AC 30, o un asfalto que se utilice de manera tradicional en las mezclas asfálticas en el país, luego comparar con los resultados obtenidos en la investigación presente para poder observar si hubo una mejora utilizando un asfalto tradicional.
6. Utilizar distintos agregados áridos a los empleados en la investigación presente, por ejemplo, utilizar arena triturada en vez de arena de río y observar cómo las mezclas asfálticas se comportan al cambiar los agregados utilizados, luego comparar y analizar los resultados de las mezclas para definir con cual agregado se obtiene el mejor desempeño al diseñar mezclas con concreto asfáltico reciclado.

BIBLIOGRAFÍA

- 360 En Concreto . (s.f.). *Agregado finos y gruesos: ¿cómo inciden en la manejabilidad del concreto?*
- AASHTO . (2017). *Especificación superpave para el diseño volumétrico de la mezcla asfáltica*.
- AASHTO . (2017). *Superpave volumetric design for asphalt mixtures* .
- AASHTO. (2004). *Penetration-graded asphalt cement*. AASHTO designation: M 20-70 (2004): AASHTO.
- AASHTO. (2004). *Viscosity-graded asphalt cement*. AASHTO designation: M 226-80 (2004).
- Allcons. (13 de 05 de 2023). *Asphalt canals: Excavation % Lining*. Obtenido de Allcons: <https://www.allcons.de/asphalt-canals/>
- Amazon . (2023). Obtenido de Whatman 1450-185 Papel de filtro cuantitativo de baja ceniza, 7.3 in de diámetro, 2,7 micras, grado 50 (paquete de 100): <https://www.amazon.com/Whatman-1450-185-Hardened-Quantitative-Diameter/dp/B00394FB1C>
- Anguas, P. G., Alamilla, H. D., López, J. A., Romero, S. A., & Orca, H. A. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas*. Queretaro: Secretaría de comunicaciones y transportes.
- Asfaltos Kean. (2 de Junio de 2023). *Venta de asfalto*. Obtenido de asfaltoskean: <https://www.asfaltoskean.com/venta-de-asfalto-rc-250/>
- ASTM. (31 de Diciembre de 2010). *Standard Specification for Coarse Aggregate for Bituminous Paving Mixtures* . Obtenido de ASTM D692-00(2004): <https://www.astm.org/standards/d692>
- ASTM. (16 de 08 de 2017). *ASTM C128*. Obtenido de ASTM: <https://www.astm.org/c0128-01.html>
- ASTM. (22 de Mayo de 2018). *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures* . Obtenido de ASTM D2172/D2172M-17e1: https://www.astm.org/d2172_d2172m-17e01.html

- ASTM. (7 de Julio de 2022). *Standard Specification for Fine Aggregate for Asphalt Paving Mixtures* .
Obtenido de ASTM D1073-16(2022): <https://www.astm.org/d1073-16r22.html>
- ASTM. (2023). *Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Bitumen from Bituminous Paving Mixtures*. Obtenido de D2172/D2172M-11.
- Banda, J. (2016). *Ciudad con baches* . El Mañana.
- Barajas, E., & Buitrago, B. (2017). *Análisis comparativo del sistema de gestión de los pavimentos o mantenimiento vial de la ciudad de bogotá con la ciudad de sao paulo* . Bogotá: Universidad Católica de Colombia .
- Biviano, G. G. (2019). *Usos de asfalto en la construcción*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Canteras El Cerro. (06 de 11 de 2009). *Mezcla de asfalto y filler*. Obtenido de Canteraselcerro: <https://www.canteraselcerro.com/mezcla-de-asfalto-y-filler/#:~:text=Los%20fillers%20son%20sustancias%20finamente,o%20corcho%2C%20raramente%20se%20utilizan.>
- CEPAL. (1994). *Caminos-Un nuevo enfoque para le gestión y conservación de redes viales*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- CONAM. (2004). *Guía técnica para la clausura y conversión de botaderos de residuos sólidos*. Perú.
- Consejo De Directores De Carreteras De Iberia E Iberoamérica. (2002). *Catálogo de deterioros de pavimentos flexibles* .
- Constructor, T. (2023). *Flexible pavement design by california bearing ratio (CBR) method*.
- Contractors Asphalt. (15 de Abril de 2020). Obtenido de Contractors Asphalt: <https://www.contractorsasphalt.com/the-advantages-and-disadvantages-of-recycling-asphalt/>
- Corredor, G., & Corros, M. (2010). *Evaluación de pavimentos* . Managua.
- (s.f.). *Diseño y conservacion de pavimentos rigidos* . Ciudad de México : Universidad Nacional Autónoma de México .

Dreamstime. (19 de 05 de 2023). *Fotos de stock*. Obtenido de Dreamstime: <https://es.dreamstime.com/maqueta-del-artilugio-tel%C3%A9fono-celular-image104748796>

Ecivil. (2023). *Filler*.

El sol de bajo. (05 de Agosto de 2022). *Inician trabajos de re-encarpetado en Mutualismo*. Obtenido de El sol de bajo: <https://www.elsoldelbajo.com.mx/local/inician-trabajos-de-re-encarpetado-en-mutualismo-8694322.html>

EMR. (2022). *Market Report Historical and Forecast market analysis*. EMR. Obtenido de Expert Market Search.

Ernst, R. (2004). *Diccionario de la técnica industrial. Inglés Español, vol 1*. Barcelona: Herder Editorial.

España, M. d. (2008). *542- Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y 543- Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*. Secretaría de estado de infraestructuras.

España, Ministerio de Fomento de. (2008). *542- Mezclas bituminosas en caliente tipo hormigón bituminoso y 543- Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*. Secretaría de estado de infraestructuras.

Estates Paving. (2023). Obtenido de Estates paving: <https://estatespaving.com/the-pros-and-cons-of-recycled-asphalt/>

Feuling, S. (08 de Julio de 2021). *Association of equipment manufacturers* . Obtenido de <https://www.aem.org/news/construction-aggregates-101-what-they-are-and-why-they-matter>

Firth. (2018). *The lowdon: rigid vs flexible pavements*.

Funes, L. (2023). *Diseño de pavimentos método AASHTO-93*. Tegucigalpa.

García, A. (2015). *Diseño de pavimento asfáltico por el metodo AASHTO-93 empleando el software DISAASHTO-93*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.

- Gilson Company, INC. (2023). *9.75in Centrifuge Extractor Filter Rings (Grade 923)*. Obtenido de <https://www.globalgilson.com/centrifuge-extractor-filter-rings-975in-grade-923>
- Giordani, C., & Leone, D. (2023). *Pavimentos*. Rosario: Universidad Tecnológica Nacional.
- Google. (13 de 05 de 2023). *Google Scholar*. Obtenido de Google: <https://scholar.google.com/>
- Grinkevich, A. (s.f.). *Pavimento agrietado* .
- Gutierrez, R., López, D., Velasco, V., & Villera, T. (2013). *Densidad bulk y porcentaje de vacíos de los agregados en estado suelto y compacto*. Universidad del Norte.
- H.W.Kessel. (2023). *Centrifuga de asfalto*. Obtenido de <https://hwkessel.com.pe/equipo/centrifuga-de-asfalto/>
- Höeg, K. (1993). *Asphaltic concrete cores for embankment dams*. Billingstad: Norwegian Geotechnical Institute.
- Impulsora De Asfaltos S.A. De C.V. (s.f.). Obtenido de Asfalto modificado con polimero SBS PG 76-22: <https://impulsoradeasfaltos.com/pg-76-22/>
- INE. (2017). *Carreteras y aeropueros 2013 2017*. Tegucigalpa.
- INE. (2018). *Carreteras y aeropueros 2014-2018*.
- INE. (2022). *Carreteras y Aeropuertos 2017 2021*. Tegucigalpa.
- INE. (2022). *Gestión integral de los residuos sólidos en Honduras*. Tegucigalpa.
- Instituto del Asfalto. (2001). *Manual básico de emulsiones asfálticas Manul series No. 19*. Asphalt Institute.
- Instituto Tecnológico de Tijuana. (2021). *Requisitos de calidad para los agregados* .
- Martínez, J. B. (2007). *Asfalto Urbano*. México D.F.: Facultad de ingeniería UNAM división de educación continua.
- Michaca, J. L., Granados, V. M., Chaires, I. C., Hernández, S. A., & Gutierrez, R. T. (2001). *Impacto ambiental de proyectos carreteros. Efectos por la construcción y conservación de superficies*

- de rodamiento: I pavimentos flexibles*. Ciudad de México: Secretaría de comunicaciones y transportes, Instituto Mexicano del transporte.
- Miguel, J. L. (2014). *Impermeabilización de losas, cisternas y cimentaciones de casas habitación*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Miranda, R. (2010). *Deterioros en pavimentos flexibles y rígidos*. Valdivia : Universidad Austral de Chile .
- NAPA. (2013). *RAP benefits for pavement owners*.
- OIML. (2011). *Guía OIML G-14: Medición de Densidad*. Organización Internacional de Metrología Legal.
- Ortiz, A. (2017). *Instructivo del proceso constructivo de una vía en pavimento flexible*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Ossa, A., & García, J. L. (27 de marzo de 2015). Residuos de construcción y demolición (RCD). 1. México.
- Padilla, A. (2004). *Materiales basicos*. UPC.
- Pérez, J., & Urrea, P. (s.f.). *Deformaciones permanentes y fatiga en concreto asfáltico*.
- Pragmacromatic. (3 de Junio de 2023). *Cemento asfáltico*. Obtenido de Pragmacromatic: <https://pragmacromatic.com/macrosur/producto/cemento-asfaltico-impтек/>
- RAE. (05 de 05 de 2023). *Diccionario panhispánico del español jurídico*. Obtenido de RAE: <https://dpej.rae.es/lema/reciclaje>
- RAE. (05 de 05 de 2023). *rae*. Obtenido de rae: <https://dle.rae.es/bituminoso>
- Recycled Materials Resource Center. (2023). Obtenido de <https://rmrc.wisc.edu/ug-mat-reclaimed-asphalt-pavement/>
- Richfield Blacktop. (2020). *6 benefits of recycling asphalt*. Minnesota.
- Schlumberger. (19 de 05 de 2023). *Energy Glossary en español*. Obtenido de Schlumberger: <https://glossary.slb.com/es/terms/p/poise>

- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2004). *Características de los materiales*.
- Secretaría de comunicaciones y transportes. (2010). *Fresado de la superficie de rodadura en pavimentos asfálticos*.
- Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (22 de febrero de 2010). Reglamento para el manejo integral de los residuos sólidos. *La Gaceta*.
- Solano, J. A., & García, J. D. (2015). *Biblioweb*. Obtenido de Tangara. edu: efaidnbmnnibpcajpcgiclfindmkaj/http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2015/157598.pdf
- SOPTRAVI. (1996). Manual de Carreteras. En D. G. Carreteras, *Tomo 5: Especificaciones generales para la construcción* (pág. 59).
- Sripath Technologies, LLC. (16 de Junio de 2023). *What is rap*. Obtenido de Sripath: <https://sripath.com/products/relixer/what-is-rap/>
- Téllez, R., & Rico, A. (1991). *Catalogo de deterioros en pavimentos flexibles de carreteras mexicanas*. Querétaro : Instituto Mexicano del Transporte .
- The Asphalt Institute. (1973). *Manual del asfalto*. Spain.
- (2014). *Tipos de fallas en pavimento flexible*.
- U.S. Department of Transportation . (2011). *Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice* . Virginia .
- U.S. Department of Transportation . (3 de Agosto de 2016). Obtenido de User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction : <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/049.cfm>
- U.S. Department of Transportation . (3 de Agosto de 2016). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* . Obtenido de Asphalt Concrete (Hot Recycling):

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap132.cfm>

U.S. Department of Transportation . (3 de Agosto de 2016). *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction* . Obtenido de Asphalt Concrete (Cold Recycling):

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap133.cfm>

U.S. Department of Transportation. (2016). *User guidelines for waste and byproduct materials in pavement construction*. Federal Highway Administration. Obtenido de Federal Highway Administration.

U.S. Department of Transportation. (2022). *Chapter 7. Hot Mix Asphalt Recycling*. Federal Highway Administration.

UNAM. (2006). *Tendido de Carpeta Asfáltica*.

UNAM. (2020). *Diseño y conservación de pavimento rígidos*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA. (2021). *Guía para inspectores de bacheo formal con mezcla asfáltica en caliente*. Universidad de Costa Rica .

UNITEC. (2023). *Designación del tamaño de las partículas*. Tegucigalpa: UNITEC.

UNITEC. (2023). *Granulometría mecánica de los agregados*. UNITEC.

UNITEC. (2023). *Manual de laboratorio de Ingeniería Civil, Laboratorio de vías de comunicación*. UNITEC.

UNITEC. (2023). *Peso específico y absorción*. UNITEC.

UTest. (2 de Junio de 2023). *Diseño ensayos de mezclas bituminosas*. Obtenido de UTEST: <https://www.utest.com.tr/es/26054/M-quina-para-Pruebas-de-Estabilidad-Marshall-con-Indicador-Digital>

Vastarintama. (12 de Enero de 2021). *qué es el impermeabilizante asfáltico*. Obtenido de Vastarintama: <https://vastarintama.net/que-es-el-impermeabilizante-asfaltico/>

Vecteezy. (13 de 05 de 2023). *free png laptop*. Obtenido de Vecteezy: <https://es.vecteezy.com/free-png-es/laptop>

Velandia, J. A. (2019). *Análisis y control de tramos de asfalto natural instalados en Santa Rosa de Viterbo*. Boyacá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Zapata, I. (s.f.). *Fatiga en los pavimentos flexibles* .

ANEXOS

Anexo 1 Asesorías temáticas

Tabla 88. Asesoría temática 1

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

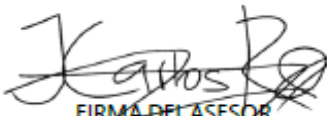
ASESORAMIENTO	Nº: 1
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga	
1.	Definición del tema de proyecto de investigación
2.	Posibilidad de aplicación del tema propuesto con instrumentos del laboratorio de Ingeniería Civil
3.	
4.	
5.	
6.	
7.	
8.	
9.	
10.	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
	Fecha: <u>22/03/23</u>

Tabla 89. Asesoría temática 2

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

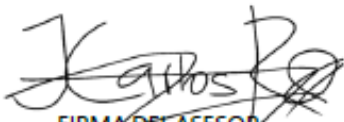
ASESORAMIENTO		Nº: <u>2</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Definición del problema de la investigación	
2.	Materiales necesarios para el proyecto	
3.	Definición del objetivo principal del proyecto de investigación	
4.	Propuesta de empresas donde se puede adquirir el cemento asfáltico	
5.	Propuesta de preguntas de investigación	
6.	Sugerencia de investigación de fuentes primarias sobre el manejo del residuo de concreto asfáltico	
7.		
8.		
9.		
10.		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>24/03/23</u>

Tabla 90. Asesoría temática 3

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041


ASESORAMIENTO		Nº: <u>3</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Definición de la normativa a utilizar para la elaboración de los especímenes de concreto asfáltico reciclado	
2.	Definición del método Marshall para la elaboración de especímenes de prueba, de modo de obtener datos referentes de una mezcla de concreto asfáltico inalterada	
3.	_____	
4.	_____	
5.	_____	
6.	_____	
7.	_____	
8.	_____	
9.	_____	
10.	_____	
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>22/04/23</u>

Tabla 91. Asesoría temática 4

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

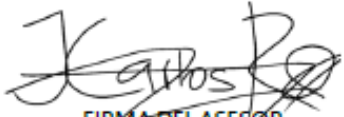
ASESORAMIENTO		Nº: <u>4</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Asesoramiento teórico del diseño de concreto asfáltico por medio del Método Marshall	
2.	Asesoramiento del procedimiento de ensayo de granulometría del agregado grueso y fino para la mezcla asfáltica	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
 FIRMA DEL ASESOR		Fecha: <u>16/04/23</u>
SEIIO		

Tabla 92. Asesoría temática 5

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúñiga	11851041


ASESORAMIENTO		Nº: <u>5</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúñiga		
1.	Asesoramiento del procedimiento de ensayo de peso específico del agregado grueso y fino para la mezcla asfáltica	
2.	Entrega de documentos del Método Marshall para diseño de mezclas de concreto asfáltico, utilizado como fuente en la elaboración de marco teórico	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
 FIRMA DEL ASESOR		Fecha: <u>18/05/23</u>
		SEIO

Tabla 93. Asesoría temática 6

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

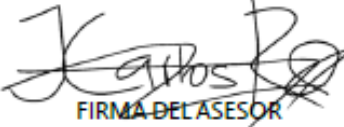
ASESORAMIENTO		Nº: <u>6</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Asesoramiento del procedimiento de ensayo de penetración al cemento asfáltico virgen	
2.	Asesoramiento del procedimiento de ensayo de ductilidad al cemento asfáltico virgen	
3.	Asesoramiento del procedimiento de ensayo de punto de encendido e ignición	
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>25/05/23</u>

Tabla 94. Asesoría temática 7

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

ASESORAMIENTO		Nº: <u>7</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Asesoramiento de procedimiento de mezcla de concreto asfáltico virgen	
2.	Apoyo con la maquina estabilizadora Marshall para ensayos de probetas de mezcla virgen	
3.	_____	
4.	_____	
5.	_____	
6.	_____	
7.	_____	
8.	_____	
9.	_____	
10.	_____	
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>29/05/23</u>

Tabla 95. Asesoría temática 8

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041


ASESORAMIENTO		Nº: <u>8</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Asesoramiento de procedimiento de mezcla de concreto asfáltico con concreto asfáltico reciclado, RAP 1 y RAP 2	
2.	Apoyo con la maquina estabilizadora Marshall para ensayos de probetas de mezcla con concreto asfáltico reciclado, RAP 1 y RAP 2	
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>05/06/23</u>

Tabla 96. Asesoría temática 9

ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041


ASESORAMIENTO	Nº: <u>9</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga	
1. Asesoramiento de procedimiento de mezcla de concreto asfáltico virgen con contenido óptimo de asfalto	
2. Asesoramiento de procedimiento de mezcla de concreto asfáltico con RAP 1 y RAP 2 con contenido óptimo de asfalto	
3. Apoyo con la maquina estabilizadora Marshall para ensayos de probetas de mezcla con concreto asfáltico reciclado con contenido óptimo de asfalto, RAP 1 y RAP 2	
4. Apoyo con la maquina estabilizadora Marshall para ensayos de probetas de mezcla con concreto asfáltico virgen con contenido óptimo de asfalto	
5. _____	
6. _____	
7. _____	
8. _____	
9. _____	
10. _____	
 FIRMA DEL ASESOR	SEIIO
	Fecha: <u>12/06/23</u>

Tabla 97. Asesoría temática 10


ACTA DE ASESORAMIENTO TÉCNICO

NOMBRE DEL PROYECTO:

Procedimiento estándar para el reciclaje de concreto asfáltico

INTEGRANTES:

NOMBRE	CUENTA
Alejandro José Bertetty López	11651039
Luis Fernando Castillo Zúniga	11851041

ASESORAMIENTO		Nº: <u>10</u>
ASESOR: M. Sc. Ing. Juan Carlos Reyes Zúniga		
1.	Asesoramiento en la redacción y pasos de la guía de procedimiento estándar que se propone (objetivo general del proyecto)	
2.	_____	
3.	_____	
4.	_____	
5.	_____	
6.	_____	
7.	_____	
8.	_____	
9.	_____	
10.	_____	
 FIRMA DEL ASESOR		SEIIO Fecha: <u>19/06/23</u>

Anexo 2. Cálculos de propiedades de mezcla virgen con porcentaje óptimo de asfalto

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

$$Gmb = \frac{Wa}{Wa - Ws} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen 1} = \frac{958.20}{958.20 - 515.13} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen 1} = 2.1626 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen 2} = \frac{1,043.20}{1,043.20 - 541.37} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen 2} = 2.0788 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = \frac{2.1626 + 2.0788}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = 2.3156 \text{ gr/cm}^3$$

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm = \frac{Wm}{W_{p+a} + Wm - W_{p+a+m}} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen 1} = \frac{102}{953.18 + 102 - 1,011.60} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen 1} = 2.3405 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen 2} = \frac{101.64}{953.18 + 101.64 - 1,010.45} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen 2} = 2.2907 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = \frac{2.3405 + 2.2907}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = 2.3156 \text{ gr/cm}^3$$

3. 3Peso específico de los agregados

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 98. Variables de pesos para mezcla virgen con % óptimo de asfalto

Material	%Por peso del agregado	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	6.27	5.90	Pb
Grava	48	45.17	P1
Arena	48	45.17	P2
Filler	4	3.76	P3
Total	106.27	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_s \text{ probeta \% óptimo virgen} = 45.17 + 45.17 + 3.76$$

$$P_s \text{ probeta \% óptimo virgen} = 94.09$$

5. Peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen } 1 = \left[\frac{P_1 + P_2 + P_3}{\left(\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}\right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen } 1 = \left[\frac{45.17 + 45.17 + 3.76}{\left(\frac{45.17}{2.767} + \frac{45.17}{2.580} + \frac{3.76}{2.650}\right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen } 1 = 2.6694$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen } 2 = \left[\frac{45.17 + 45.17 + 3.76}{\left(\frac{45.17}{2.767} + \frac{45.17}{2.580} + \frac{3.76}{2.650}\right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen } 2 = 2.6694$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = \frac{2.6694 + 2.6694}{2}$$

$$Gsb \text{ probeta \% óptimo virgen promedio} = 2.6694$$

6. Peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse = \left[\frac{100 - P_b}{\left(\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}\right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = \left[\frac{100 - 5.90}{\left(\frac{100}{2.3405} - \frac{5.90}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = 2.5512$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 2 = \left[\frac{100 - 5.90}{\left(\frac{100}{2.2907} - \frac{5.90}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 2 = 2.4886$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen promedio} = \frac{2.5512 + 2.4886}{2}$$

$$Gse \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen promedio} = 2.5199$$

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba = 100 * \left[\frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} \right] * Gb$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = 100 * \left[\frac{2.5512 - 2.6694}{2.6694 * 2.5512} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = -1.7524$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 2 = 100 * \left[\frac{2.4886 - 2.6694}{2.6694 * 2.4886} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 2 = -2.7491$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen promedio} = \frac{-1.7524 + -2.7491}{2}$$

$$Pba \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen promedio} = -2.2507$$

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

$$Pbe \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = 5.90 - \frac{-1.7524}{100} * 94.0999$$

$$Pbe \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 1 = 7.5491$$

$$Pbe \text{ probeta \% } \acute{o}ptimo \text{ virgen } 2 = 5.90 - \frac{-2.7491}{100} * 94.0999$$

$$Pbe \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 8.4869$$

$$Pbe \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = \frac{7.5491 + 8.4869}{2}$$

$$Pbe \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = 8.0180$$

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 1} = 100 - \frac{2.1626 * 94.0999}{2.6694}$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 1} = 23.7645\%$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 100 - \frac{2.0788 * 94.0999}{2.6694}$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 26.7202\%$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = \frac{23.7645 + 26.7202}{2}$$

$$VMA \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = 25.2424\%$$

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 1} = 100 * \frac{2.3405 - 2.1626}{2.3405}$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 1} = 7.6002\%$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 100 * \frac{2.2907 - 2.0788}{2.2907}$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 9.2523\%$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = \frac{7.6002 + 9.2523}{2}$$

$$Pa \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen promedio} = 8.4263\%$$

11. Estabilidad corregida

$$Volumen \text{ probeta \% \acute{o}ptimo virgen 1} = 462.19 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen probeta \% \acute{o}ptimo virgen 2} = 519.18 \text{ cm}^3$$

Tabla 99. Factor de correcci3n para probetas con \% 3acute{o}ptimo de asfalto mezcla virgen

Volume of Specimen, cm ³	of Specimen, in.	mm	Correlation Ratio
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 ¹ / ₁₆	27.0	5.00
226 to 237	1 ¹ / ₈	28.6	4.55
238 to 250	1 ³ / ₁₆	30.2	4.17
251 to 264	1 ¹ / ₄	31.8	3.85
265 to 276	1 ³ / ₁₆	33.3	3.57
277 to 289	1 ³ / ₈	34.9	3.33
290 to 301	1 ⁷ / ₁₆	36.5	3.03
302 to 316	1 ¹ / ₂	38.1	2.78
317 to 328	1 ⁹ / ₁₆	39.7	2.50
329 to 340	1 ⁵ / ₈	41.3	2.27
341 to 353	1 ¹¹ / ₁₆	42.9	2.08
354 to 367	1 ³ / ₄	44.4	1.92
368 to 379	1 ¹³ / ₁₆	46.0	1.79
380 to 392	1 ⁷ / ₈	47.6	1.67
393 to 405	1 ¹⁵ / ₁₆	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 ¹ / ₁₆	52.4	1.39
432 to 443	2 ¹ / ₈	54.0	1.32
444 to 456	2 ³ / ₁₆	55.6	1.25
457 to 470	2 ¹ / ₄	57.2	1.19
471 to 482	2 ⁷ / ₁₆	58.7	1.14
483 to 495	2 ³ / ₈	60.3	1.09
496 to 508	2 ⁷ / ₁₆	61.9	1.04
509 to 522	2 ¹ / ₂	63.5	1.00
523 to 535	2 ⁹ / ₁₆	65.1	0.96
536 to 546	2 ⁵ / ₈	66.7	0.93
547 to 559	2 ¹¹ / ₁₆	68.3	0.89
560 to 573	2 ³ / ₄	69.9	0.86
574 to 585	2 ¹³ / ₁₆	71.4	0.83
586 to 598	2 ⁷ / ₈	73.0	0.81
599 to 610	2 ¹⁵ / ₁₆	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

*Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 1 = Estabilidad * factor de correcci3n*

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 1} = 4.54 \text{ kN} * 1.19$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 1} = 5.4026 \text{ kN}$$

$$\text{Volumen probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 2} = 519.18 \text{ cm}^3$$

*Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 2 = Estabilidad * factor de correcci3n*

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 2} = 3.87 \text{ kN} * 1$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen 2} = 3.87 \text{ kN}$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen promedio} = \frac{5.4026 + 3.87}{2}$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta \% 3acute{o}ptimo virgen promedio} = 4.64 \text{ kN}$$

Estabilidad corregida probeta % óptimo virgen promedio = 1,043 lb

12. Flujo 0.01 in

Flujo probeta % óptimo virgen 1 = 12.55 centésimas de pulgada

Flujo probeta % óptimo virgen 2 = 13.77 centésimas de pulgada

$$Flujo\ probeta\ \% \acute{o}ptimo\ virgen\ promedio = \frac{12.55 + 13.77}{2}$$

Flujo probeta % óptimo virgen promedio = 13.16 centésimas de pulgada

Anexo 3. Cálculo de propiedades de mezcla de concreto asfáltico con RAP1

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

$$Gmb\ probeta\ 5\% \text{ RAP } 1 = \frac{1,067.59}{1,067.59 - 549.12} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb\ probeta\ 5\% \text{ RAP } 1 = 2.0591\ gr/cm^3$$

A continuación, se muestran los resultados de la gravedad específica de la pastilla compactada de los 5 porcentajes:

Tabla 100. Gmb de mezcla con RAP1 para los contenidos de asfalto de prueba

Porcentaje	Gmb
5%	2.0591
5.5%	2.0522
6%	2.0740
6.5%	2.0745
7%	2.0728

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm\ probeta\ 5\% \text{ RAP } 1 = \frac{90.49}{966.80 + 90.49 - 1,020.44} = gr/cm^3$$

$$Gmm\ probeta\ 5\% \text{ RAP } 1 = 2.4556\ gr/cm^3$$

Los resultados para la gravedad específica de la mezcla suelta de todos los porcentajes se muestran a continuación:

Tabla 101. Gmm de mezcla con RAP1 para los contenidos de asfalto de prueba

Porcentaje	gmm
5%	2.4556
5.5%	2.3947
6%	2.3094
6.5%	2.1236
7%	2.1057

3. Peso específico de los agregados

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010 gr/cm^3

G4: Peso específico del RAP 1= 2.36 gr/cm^3

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 102. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	4.14	Pb
Grava	38.76	P1
Arena	38.76	P2
Filler	3.23	P3
RAP	15.11	P4
Total	100	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 38.76 + 38.76 + 3.23 + 15.11$$

$$P_s \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 95.86$$

Tabla 103. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 5.5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	4.64	Pb
Grava	38.56	P1
Arena	38.56	P2
Filler	3.21	P3
RAP	15.03	P4
Total	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta } 5.5\% \text{ RAP } 1 = 38.56 + 38.56 + 3.21 + 15.03$$

$$P_s \text{ probeta } 5.5\% \text{ RAP } 1 = 95.36$$

Tabla 104. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 6% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	5.15	Pb
Grava	38.35	P1
Arena	38.35	P2
Filler	3.20	P3
RAP	14.95	P4
Total	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta } 6\% \text{ RAP } 1 = 38.35 + 38.35 + 3.20 + 14.95$$

$$P_s \text{ probeta } 6\% \text{ RAP } 1 = 94.85$$

Tabla 105. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 6.5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	5.65	Pb
Grava	38.15	P1
Arena	38.15	P2
Filler	3.18	P3
RAP	14.87	P4
Total	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta 6.5\% RAP 1} = 38.15 + 38.15 + 3.18 + 14.87$$

$$P_s \text{ probeta 6.5\% RAP 1} = 94.35$$

Tabla 106. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con 7% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	6.16	Pb
Grava	37.94	P1
Arena	37.94	P2
Filler	3.16	P3
RAP	14.79	P4
Total	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta 7\% RAP 1} = 37.94 + 37.94 + 3.16 + 14.79$$

$$P_s \text{ probeta 7\% RAP 1} = 93.84$$

5. Peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb \text{ probeta 5\% RAP 1} = \left[\frac{38.76 + 38.76 + 3.23 + 15.11}{\left(\frac{38.76}{2.767} + \frac{38.76}{2.580} + \frac{3.23}{2.65} + \frac{15.11}{2.36} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta 5\% RAP 1} = 2.6154 \text{ gr/cm}^3$$

Los resultados de peso específico Bulk del agregado total se muestran a continuación:

Tabla 107. Peso específico Bulk de mezcla asfáltica con RAP1

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.6154	2.6154	2.6154	2.6154	2.6154

6. Peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = \left[\frac{100 - 4.14}{\left(\frac{100}{2.4556} - \frac{4.14}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 2.6174 \text{ gr/cm}^3$$

A continuación, se presentan los resultados de peso específico de la muestra suelta:

Tabla 108. Peso específico efectivo de la mezcla suelta con RAP1

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.6174	2.5659	2.4829	2.2738	2.2672

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 100 * \left[\frac{2.6174 - 2.6154}{2.6154 * 2.6174} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 0.0304$$

Los resultados obtenidos de asfalto absorbido por el agregado se muestran a continuación:

Tabla 109. Asfalto absorbido por el agregado de la mezcla con RAP1

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
0.0304	-0.7448	-2.0608	-5.8021	-5.9308

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

Para el cálculo del contenido efectivo de asfalto en la mezcla de 5% de asfalto se hizo uso de la siguiente ecuación:

$$Pbe \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 4.14 - \frac{0.0304}{100} * 95.86$$

$$Pbe \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 4.1108$$

Enseguida se muestra el contenido efectivo de asfalto en la mezcla de todos los porcentajes de asfalto:

Tabla 110. Contenido efectivo de asfalto Pbe de la mezcla con RAP1

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
4.1108	5.3503	7.1046	11.1242	11.7255

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

Se calculó el porcentaje de vacíos del agregado mineral por medio de la Ecuación 33. Porcentaje de vacíos de agregado mineral, como se muestra a continuación.

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

$$VMA \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 100 - \frac{2.0591 * 95.86}{2.6154}$$

$$VMA \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 24.5280\%$$

Los resultados de porcentaje de vacíos de agregado mineral se presentan a continuación.

Tabla 111. Porcentaje de vacíos del agregado mineral VMA de la mezcla con RAP1

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
24.528	25.1738	24.7824	25.1608	25.629

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 100 * \frac{2.4556 - 2.0591}{2.4556}$$

$$Pa \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 16.1472\%$$

A continuación, se muestra el porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada de todos los porcentajes de asfalto:

Tabla 112. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada con RAP1 (Pa)

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
16.1472	14.3027	10.1931	2.3117	1.5656

11. Estabilidad corregida

Se realizó la corrección por volumen de la estabilidad obtenida por la máquina de estabilidad Marshall por medio de la Tabla 42.

$$Volumen \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 1 = 531.26 \text{ cm}^3$$

*Estabilidad corregida probeta 5% RAP 1 = Estabilidad * factor de corrección*

*Estabilidad corregida probeta 5% RAP 1 = 4.68 kN * 0.96*

Estabilidad corregida probeta 5% RAP 1 = 4.49 kN

Se realizó el mismo cálculo para las demás probetas y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 113. Resultados de estabilidad para mezcla con RAP1

Porcentaje	Volumen (cm ³)	Estabilidad (kN)	Correlation ratio	Estabilidad corregida
5%	531.26	4.68	0.96	4.49
5.5%	487.50	1.85	1.09	2.02
6%	511.88	2.60	1	2.60
6.5%	463.28	3.32	1.19	3.95
7%	509.76	5.25	1	5.25

12. Flujo 0.01 in

Después de someter a prueba las probetas con los distintos porcentajes de asfalto se obtuvieron los siguientes resultados de deformación:

Tabla 114. Resultados de deformación para mezcla con RAP1

Porcentaje	Deformación (0.01 pulg)
5%	17.07
5.5%	19.82
6%	20.47
6.5%	26.57
7%	20.84

13. Porcentaje óptimo de asfalto

- Gráfica Estabilidad vs % de asfalto

Por medio de la gráfica se obtuvo un porcentaje de 7% de asfalto correspondiente a la estabilidad máxima alcanzada por las 5 probetas realizadas.

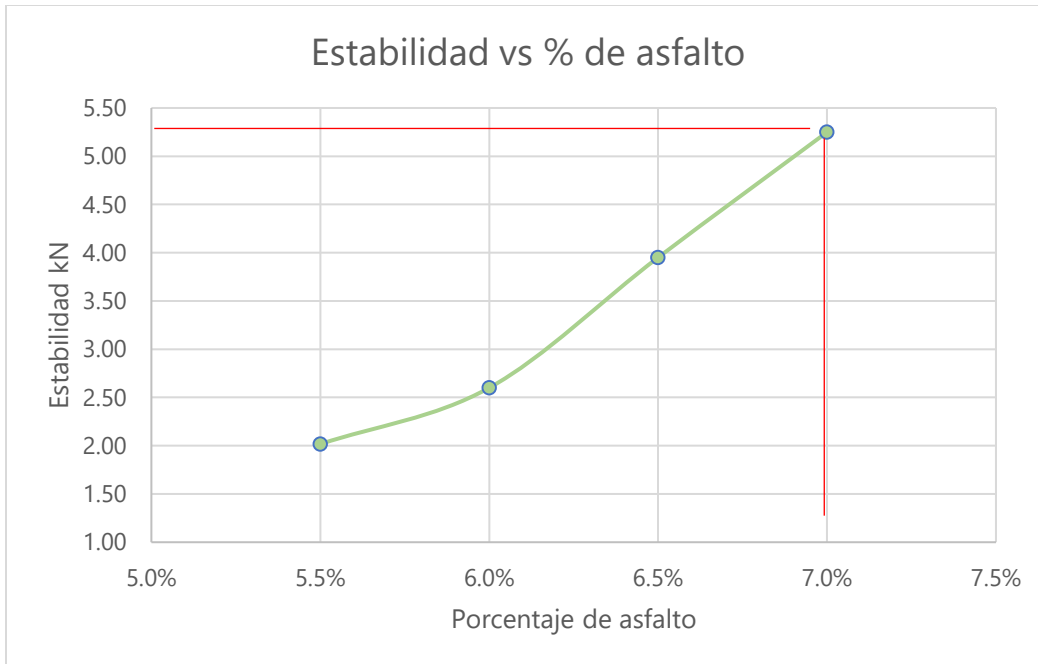


Ilustración 115. Gráfica de estabilidad vs % de asfalto para mezcla con RAP1

- Gráfica Pa vs % de asfalto

Se obtuvo un porcentaje de 6.45% de asfalto correspondiente a 4% de porcentaje de vacíos.

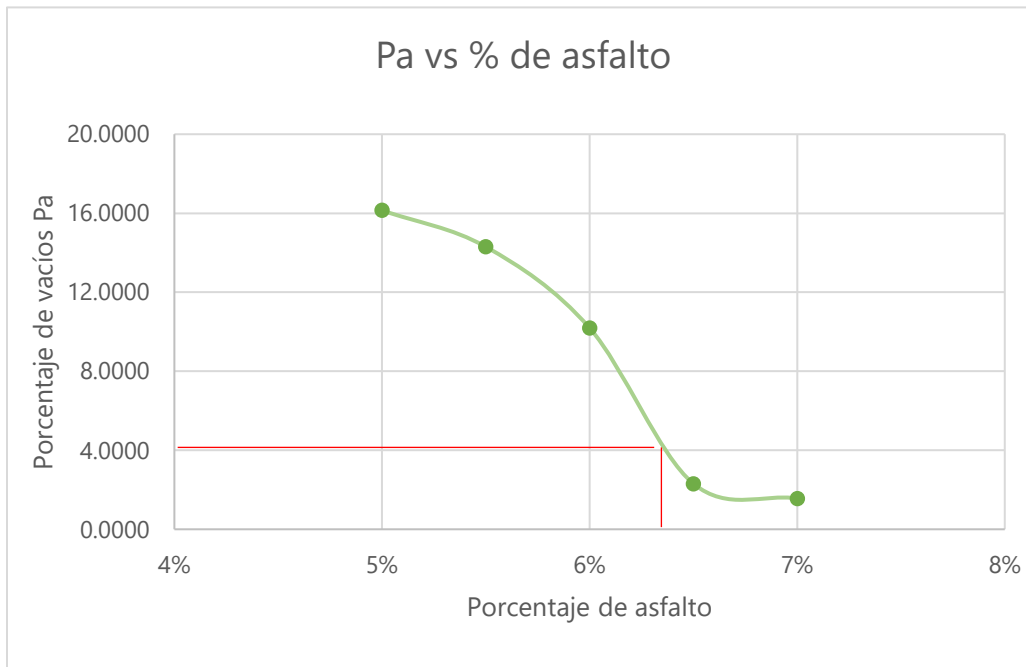


Ilustración 116. Gráfico de Pa vs % de asfalto para mezcla con RAP1

- Gráfica Gmb vs % de asfalto

Se obtuvo el porcentaje de 6.2% de asfalto correspondiente al Gmb máximo de las 5 probetas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil.

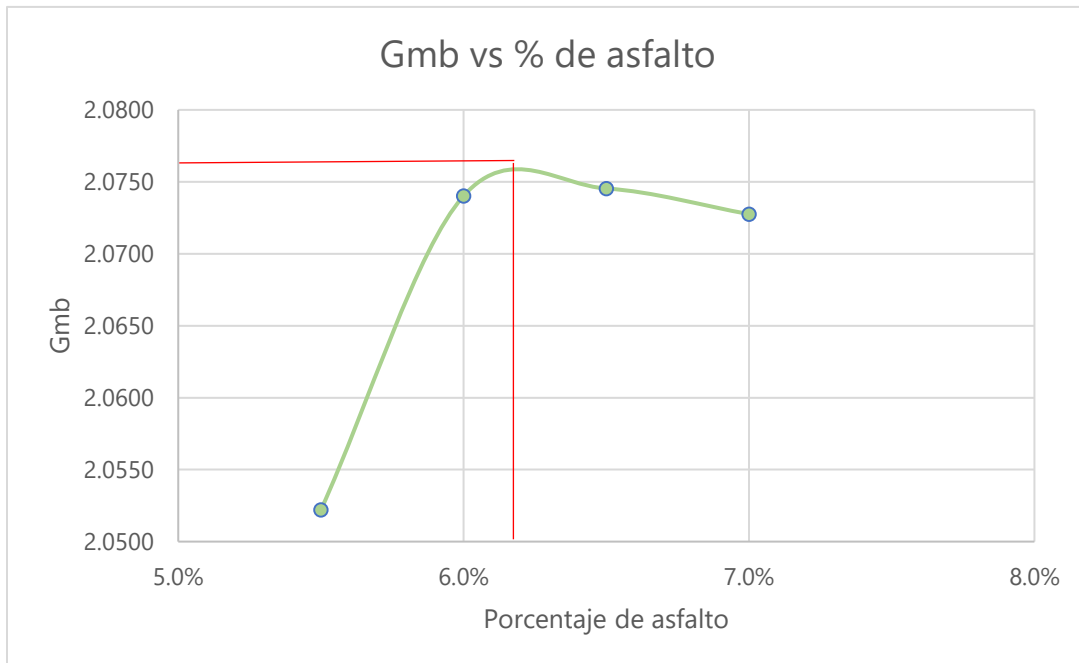


Ilustración 117. Gráfica Gmb vs % de asfalto para mezcla con RAP1

- Cálculo de porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla con concreto asfáltico reciclado del sitio 1

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{\%_1 + \%_2 + \%_3}{3}$$

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{7 + 6.45 + 6.2}{3}$$

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = 6.55\%$$

Anexo 4. Cálculo de propiedades de mezcla de concreto asfáltico con RAP2

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

$$Gmb \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = \frac{963.31}{963.31 - 494.51} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 2.0548 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 115. Gmb de mezcla con RAP2 para los contenidos de asfalto de prueba

Porcentaje	Gmb
5%	2.0548
5.5%	2.0863
6%	2.0897
6.5%	2.0963
7%	2.1721

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = \frac{100.27}{966.80 + 100.27 - 1,028.33} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 2.5883 \text{ gr/cm}^3$$

Los resultados para la gravedad específica de la mezcla suelta de todos los porcentajes se muestran a continuación:

Tabla 116. Gmm de mezcla con RAP2 para los contenidos de asfalto de prueba

Porcentaje	gmm
5%	2.5883
5.5%	2.6347
6%	2.4683
6.5%	2.2307
7%	2.2285

3. Peso específico de los agregados

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010 gr/cm^3

G4: Peso específico del RAP 2= 2.42 gr/cm^3

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 117. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	4.14	Pb
Grava	38.76	P1
Arena	38.76	P2
Filler	3.23	P3
RAP	15.11	P4
Total	100	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 38.76 + 38.76 + 3.23 + 15.11$$

$$P_s \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 95.86$$

A continuación, se presentan las tablas para los demás porcentajes:

Tabla 118. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 5.5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	4.64	Pb
Grava	38.56	P1
Arena	38.56	P2
Filler	3.21	P3
RAP	15.03	P4
Total	100.00	

$$P_s = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

$$P_s \text{ probeta } 5.5\% \text{ RAP } 2 = 38.56 + 38.56 + 3.21 + 15.03$$

$$P_s \text{ probeta } 5.5\% \text{ RAP } 2 = 95.36$$

Tabla 119. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 6% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	5.15	Pb
Grava	38.35	P1
Arena	38.35	P2
Filler	3.20	P3
RAP	14.95	P4
Total	100.00	

$$P_s = P1 + P2 + P3 + P4$$

$$P_s \text{ probeta } 6\% \text{ RAP } 2 = 38.35 + 38.35 + 3.20 + 14.95$$

$$P_s \text{ probeta } 6\% \text{ RAP } 2 = 94.85$$

Tabla 120. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 6.5% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	5.65	Pb
Grava	38.15	P1
Arena	38.15	P2
Filler	3.18	P3
RAP	14.87	P4
Total	100.00	

$$P_s = P1 + P2 + P3 + P4$$

$$P_s \text{ probeta } 6.5\% \text{ RAP } 2 = 38.15 + 38.15 + 3.18 + 14.87$$

$$P_s \text{ probeta } 6.5\% \text{ RAP } 2 = 94.35$$

Tabla 121. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con 7% de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	6.16	Pb
Grava	37.94	P1
Arena	37.94	P2
Filler	3.16	P3
RAP	14.79	P4
Total	100.00	

$$P_s = P1 + P2 + P3 + P4$$

$$P_s \text{ probeta 7\% RAP 2} = 37.94 + 37.94 + 3.16 + 14.79$$

$$P_s \text{ probeta 7\% RAP 2} = 93.84$$

5. Peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb \text{ probeta 5\% RAP 2} = \left[\frac{38.76 + 38.76 + 3.23 + 15.11}{\left(\frac{38.76}{2.767} + \frac{38.76}{2.580} + \frac{3.23}{2.65} + \frac{15.11}{2.42} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta 5\% RAP 2} = 2.6267 \text{ gr/cm}^3$$

Tabla 122. Peso específico Bulk de mezcla asfáltica con RAP2

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.6267	2.6267	2.6267	2.6267	2.6267

6. Peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse \text{ probeta 5\% RAP 2} = \left[\frac{100 - 4.14}{\left(\frac{100}{2.5883} - \frac{4.14}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta 5\% RAP 2} = 2.7756 \text{ gr/cm}^3$$

A continuación, se presentan los resultados de peso específico de la muestra suelta:

Tabla 123. Peso específico efectivo de la mezcla suelta con RAP2 (Gse)

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.7756	2.8584	2.6783	2.4048	2.4202

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 100 * \left[\frac{2.7756 - 2.6267}{2.6267 * 2.7756} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 2.0621$$

Los resultados obtenidos de asfalto absorbido por el agregado se muestran a continuación:

Tabla 124. Asfalto absorbido por el agregado de la mezcla con RAP2

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.0621	3.1164	0.7401	-3.5493	-3.282

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

$$Pbe \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 4.14 - \frac{2.0621}{100} * 95.86$$

$$Pbe \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 2.1632$$

Se muestra el contenido efectivo de asfalto en la mezcla de todos los porcentajes de asfalto:

Tabla 125. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla con RAP2 (Pbe)

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
2.1632	1.6682	4.4480	8.9988	9.2399

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

$$VMA \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 100 - \frac{2.0548 * 95.86}{2.6267}$$

$$VMA \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 25.0108\%$$

Tabla 126. Porcentaje de vacíos del agregado mineral de la mezcla con RAP2 (VMA)

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
25.0108	24.2584	24.5430	24.7043	22.4027

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

$$Pa \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 100 * \frac{2.5883 - 2.0548}{2.5883}$$

$$Pa \text{ probeta } 5\% \text{ RAP } 2 = 20.6098\%$$

Tabla 127. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla con RAP2 compactada (Pa)

5.0%	5.5%	6.0%	6.5%	7.0%
20.6098	20.8124	15.3401	6.0273	2.5316

11. Estabilidad corregida

$$\text{Volumen probeta 5\% RAP 2} = 496.38 \text{ cm}^3$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta 5\% RAP 2} = \text{Estabilidad} * \text{factor de corrección}$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta 5\% RAP 2} = 1.45 \text{ kN} * 1.04$$

$$\text{Estabilidad corregida probeta 5\% RAP 2} = 1.51 \text{ kN}$$

Tabla 128. Estabilidad de probetas con mezcla con RAP2

Porcentaje	Volumen (cm ³)	Estabilidad (kN)	Correlation ratio	Estabilidad corregida
5%	496.38	1.45	1.04	1.51
5.5%	477.12	1.91	1.14	2.18
6%	509.86	1.79	1	1.79
6.5%	488.17	2.47	1.09	2.69
7%	477.66	3.78	1.14	4.31

12. Flujo 0.01 in

Tabla 129. Deformación de probetas con mezcla con RAP2

Porcentaje	Deformación (0.01 pulg)
5%	12.60
5.5%	12.70
6%	12.76
6.5%	12.80
7%	16.37

13. Porcentaje óptimo de asfalto

- Gráfica Estabilidad vs % de asfalto

Por medio de la gráfica se obtuvo un porcentaje de 7% de asfalto correspondiente a la estabilidad máxima alcanzada por las 5 probetas realizadas.

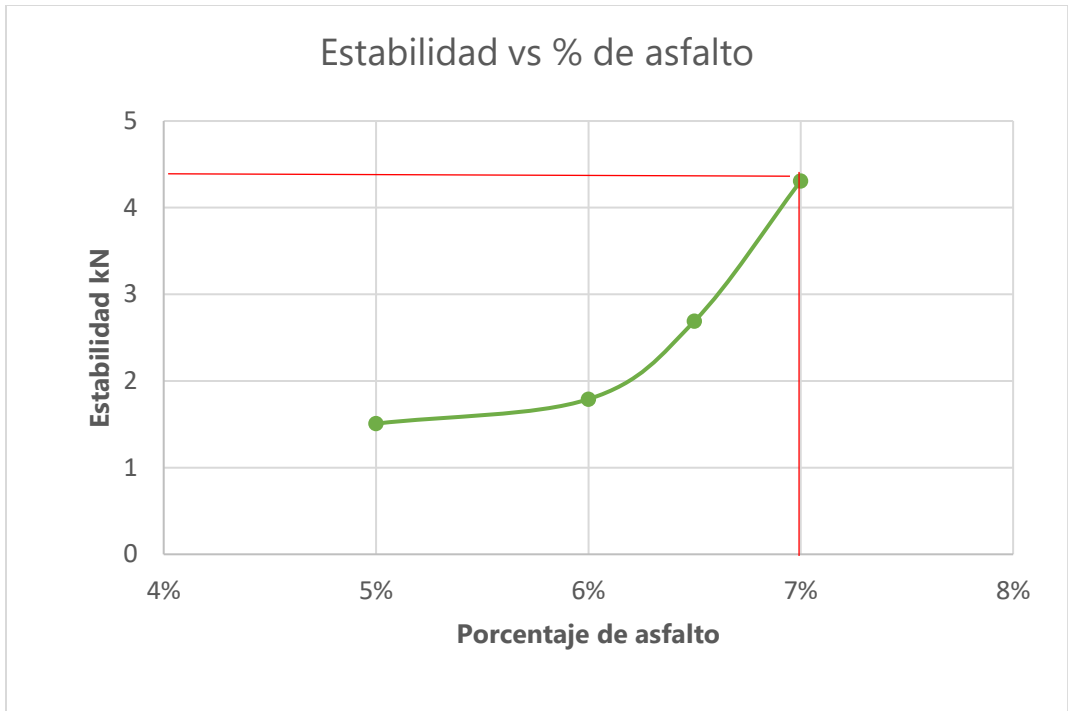


Ilustración 118. Gráfica estabilidad vs % de asfalto para mezcla con RAP2

- Gráfica Pa vs % de asfalto

Se obtuvo un porcentaje de 6.6% de asfalto correspondiente a 4% de porcentaje de vacíos.

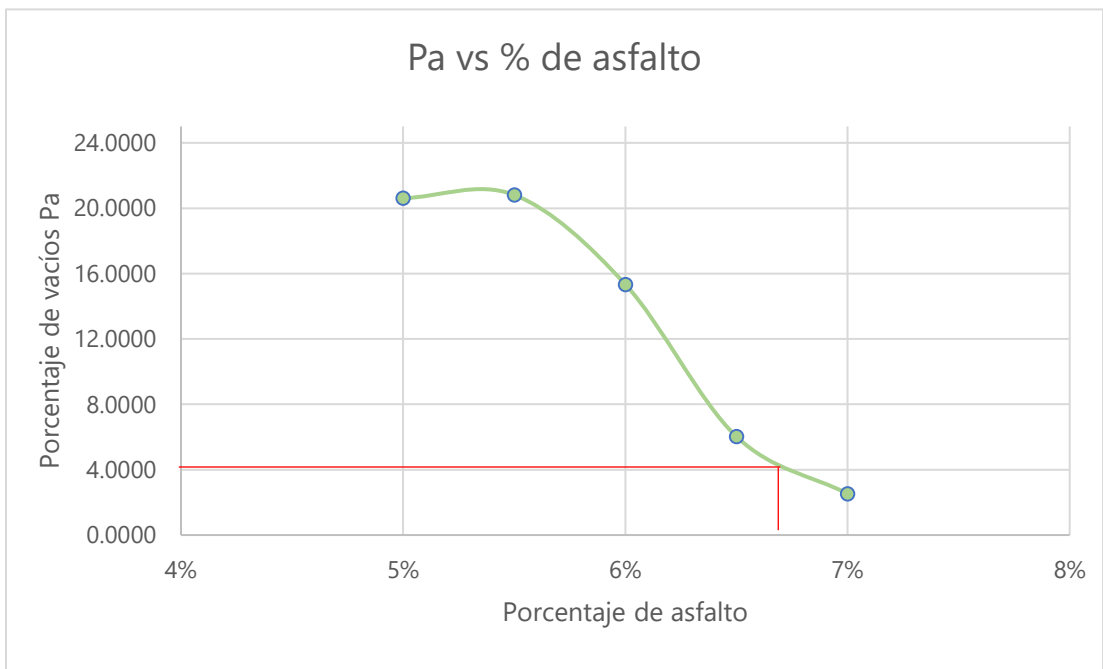


Ilustración 119. Gráfica Pa vs % de asfalto de mezcla con RAP2

- Gráfica Gmb vs % de asfalto

Por medio de la gráfica de gravedad específica de las probetas compactadas con concreto asfáltico reciclado, se obtuvo el porcentaje de 7% de asfalto correspondiente al Gmb máximo de las 5 probetas realizadas en el laboratorio de Ingeniería Civil.

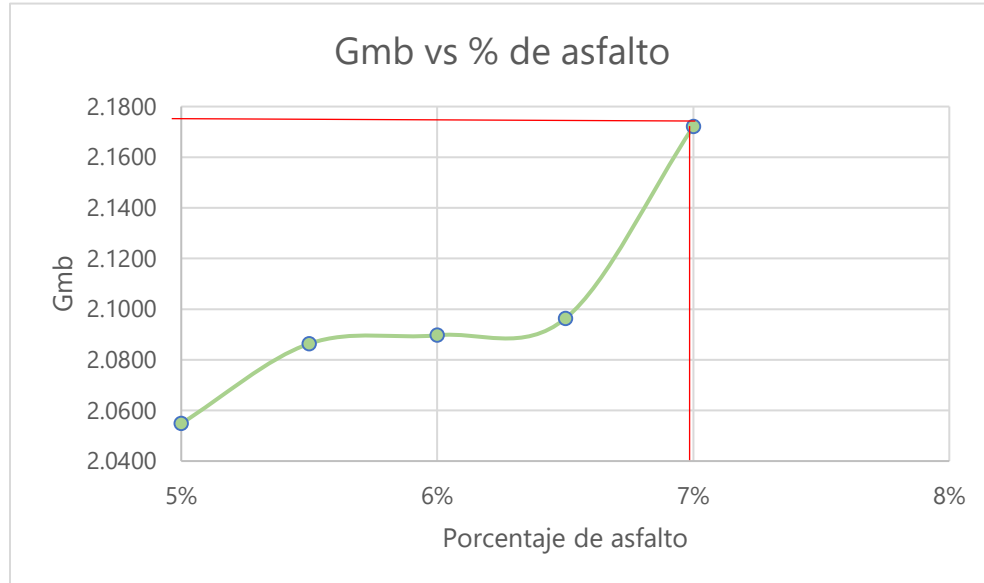


Ilustración 120. Gráfica de Gmb vs % de asfalto para mezcla con RAP2

- Cálculo de porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla con concreto asfáltico reciclado del sitio 2

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{\%_1 + \%_2 + \%_3}{3}$$

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{7 + 6.6 + 7}{3}$$

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = 6.87\%$$

Anexo 5. Cálculos de propiedades de mezcla RAP1 con porcentaje óptimo de asfalto

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = \frac{999.50}{999.50 - 522.07} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 2.0935 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = \frac{986.60}{986.60 - 520.73} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 2.1177 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{2.0935 + 2.1177}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 2.1056 \text{ gr/cm}^3$$

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = \frac{103.60}{953.18 + 103.60 - 1,011.10} = \text{gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 2.2679 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = \frac{101.70}{953.18 + 101.70 - 1,010.00} = \text{gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 2.2660 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{2.2679 + 2.2660}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 2.2670 \text{ gr/cm}^3$$

3. Peso específico de los agregados

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010 gr/cm^3

G4: Peso específico del RAP 1= 2.36 gr/cm^3

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 130. Variables para pesos para mezcla de RAP1 con % óptimo de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	5.70	Pb
Grava	38.13	P1
Arena	38.13	P2
Filler	3.18	P3
RAP	14.87	P4
Total	100.00	

$$Ps = P1 + P2 + P3 + P4$$

$$Ps \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1} = 38.13 + 38.13 + 3.18 + 14.87$$

$$Ps \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 1} = 94.30$$

5. Peso espec\u00edfico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.1} = \left[\frac{38.13 + 38.13 + 3.18 + 14.87}{\left(\frac{38.13}{2.767} + \frac{38.13}{2.580} + \frac{3.18}{2.65} + \frac{14.87}{2.36} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.1} = 2.6154 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.2} = \left[\frac{38.13 + 38.13 + 3.18 + 14.87}{\left(\frac{38.13}{2.767} + \frac{38.13}{2.580} + \frac{3.18}{2.65} + \frac{14.87}{2.36} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.2} = 2.6154 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio} = \frac{2.6154 + 2.6154}{2}$$

$$Gsb \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio} = 2.6154 \text{ gr/cm}^3$$

6. Peso espec\u00edfico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.1} = \left[\frac{100 - 5.70}{\left(\frac{100}{2.2679} - \frac{5.70}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.1} = 2.4527 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.2} = \left[\frac{100 - 5.70}{\left(\frac{100}{2.2660} - \frac{5.70}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.2} = 2.4503 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio} = \frac{2.4527 + 2.4503}{2}$$

$$Gse \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio} = 2.4515 \text{ gr/cm}^3$$

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba \text{ probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1.1} = 100 * \left[\frac{2.4527 - 2.6154}{2.6154 * 2.4527} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = -2.5613$$

$$Pba \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 100 * \left[\frac{2.4503 - 2.6154}{2.6154 * 2.4503} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = -2.6010$$

$$Pba \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{-2.5613 + -2.6010}{2}$$

$$Pba \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = -2.5811$$

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 5.70 - \frac{-2.5613}{100} * 94.30$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 8.1178$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 5.70 - \frac{-2.6010}{100} * 94.30$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 8.1553$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{8.1178 + 8.1553}{2}$$

$$Pbe \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 8.1366$$

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 100 - \frac{2.0935 * 94.30}{2.6154}$$

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 24.5178\%$$

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 100 - \frac{2.1177 * 94.30}{2.6154}$$

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 23.6432\%$$

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{24.5178 + 23.6432}{2}$$

$$VMA \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 24.0805\%$$

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 100 * \frac{2.2679 - 2.0935}{2.2679}$$

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 7.6920\%$$

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 100 * \frac{2.2660 - 2.1177}{2.2660}$$

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 6.5438\%$$

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{7.6920 + 6.5438}{2}$$

$$Pa \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 7.1179\%$$

11. Estabilidad corregida

$$Volumen \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 508.2506 \text{ cm}^3$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = Estabilidad * \text{ factor de corrección}$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 3.59 \text{ kN} * 1.04$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 3.7336 \text{ kN}$$

$$Volumen \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 493.4915 \text{ cm}^3$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = Estabilidad * \text{ factor de corrección}$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 4.46 \text{ kN} * 1.09$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 4.8614 \text{ kN}$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = \frac{3.7336 + 4.8614}{2}$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 4.2975 \text{ kN}$$

$$Estabilidad \text{ corregida probeta } \% \text{ óptimo RAP 1 promedio} = 966.68 \text{ lb}$$

12. Flujo 0.01 in

Después de someter a prueba las probetas de porcentaje óptimo de la mezcla virgen se obtuvieron los siguientes resultados:

$$Flujo \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.1} = 13.26 \text{ centésimas de pulgada}$$

$$Flujo \text{ probeta } \% \text{ óptimo RAP 1.2} = 15.77 \text{ centésimas de pulgada}$$

$$\text{Flujo probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio} = \frac{13.26 + 15.77}{2}$$

Flujo probeta \% \acute{o}ptimo RAP 1 promedio = 14.515 centésimas de pulgada

Anexo 6. Cálculos de propiedades de mezcla RAP2 con porcentaje \acute{o}ptimo de asfalto

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (Gmb)

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.1} = \frac{1,015.80}{1,015.80 - 544.36} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.1} = 2.1547 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.2} = \frac{1,034.24}{1,034.24 - 565.64} * \frac{1gr}{cm^3} = gr/cm^3$$

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.2} = 2.2071 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2 promedio} = \frac{2.1547 + 2.2071}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmb \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2 promedio} = 2.1809 \text{ gr/cm}^3$$

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.1} = \frac{103.40}{954.86 + 103.40 - 1,013.59} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.1} = 2.3148 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.2} = \frac{103.37}{954.86 + 103.37 - 1,013.46} = gr/cm^3$$

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2.2} = 2.3089 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2 promedio} = \frac{2.3148 + 2.3089}{2} \text{ gr/cm}^3$$

$$Gmm \text{ probeta \acute{o}ptimo RAP 2 promedio} = 2.3118 \text{ gr/cm}^3$$

3. Peso específico de los agregados

G1: Peso específico de la grava= 2.767 gr/cm^3

G2: Peso específico de la arena= 2.580 gr/cm^3

G3: Peso específico del filler = 2.650 gr/cm^3

Gb: Peso específico del cemento asfáltico= 1.010 gr/cm^3

G4: Peso específico del RAP 1= 2.75 gr/cm^3

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 131. Variables para pesos para mezcla de RAP2 con % óptimo de asfalto

Material	% Por peso de la mezcla	Dato
Asfalto	6.03	Pb
Grava	38.00	P1
Arena	38.00	P2
Filler	3.17	P3
RAP	14.81	P4
Total	100.00	

$$Ps = P1 + P2 + P3 + P4$$

$$Ps \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2 = 38 + 38 + 3.17 + 14.81$$

$$Ps \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2 = 93.9704$$

5. Peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2.1 = \left[\frac{P1 + P2 + P3 + P4}{\left(\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2.1 = \left[\frac{38 + 38 + 3.17 + 14.81}{\left(\frac{38}{2.767} + \frac{38}{2.580} + \frac{3.17}{2.65} + \frac{14.81}{2.75} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2.1 = 2.6818 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2.2 = \left[\frac{38 + 38 + 3.17 + 14.81}{\left(\frac{38}{2.767} + \frac{38}{2.580} + \frac{3.17}{2.65} + \frac{14.81}{2.75} \right)} \right]$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2.2 = 2.6818 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2 \text{ promedio} = \frac{2.6818 + 2.6818}{2}$$

$$Gsb \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP } 2 \text{ promedio} = 2.6818 \text{ gr/cm}^3$$

6. Peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = \left[\frac{100 - 6.03}{\left(\frac{100}{2.3148} - \frac{6.03}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 2.5240 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = \left[\frac{100 - 6.03}{\left(\frac{100}{2.3089} - \frac{6.03}{1.010} \right)} \right]$$

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 2.5166 \text{ gr/cm}^3$$

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = \frac{2.5240 + 2.5166}{2}$$

$$Gse \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = 2.5203 \text{ gr/cm}^3$$

7. Asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 100 * \left[\frac{2.5240 - 2.6818}{2.6818 * 2.5240} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = -2.3549$$

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 100 * \left[\frac{2.5166 - 2.6818}{2.6818 * 2.5166} \right] * 1.010$$

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = -2.4723$$

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = \frac{-2.3549 + -2.4723}{2}$$

$$Pba \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = -2.4136$$

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

$$Pbe \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 6.03 - \frac{-2.3549}{100} * 93.9704$$

$$Pbe \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 8.2429$$

$$Pbe \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 6.03 - \frac{-2.4723}{100} * 93.9704$$

$$Pbe \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 8.3533$$

$$Pbe \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = \frac{8.2429 + 8.3533}{2}$$

$$P_{be} \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = 8.2981$$

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 100 - \frac{2.1547 * 93.9704}{2.6818}$$

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 24.5001\%$$

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 100 - \frac{2.2071 * 93.9704}{2.6818}$$

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 22.6636\%$$

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = \frac{24.5001 + 22.6636}{2}$$

$$VMA \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = 23.5819\%$$

10. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 100 * \frac{2.3148 - 2.1547}{2.3148}$$

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 6.9155\%$$

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 100 * \frac{2.3089 - 2.2071}{2.3089}$$

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 4.4102\%$$

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = \frac{6.9155 + 4.4102}{2}$$

$$Pa \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2 promedio} = 5.6629\%$$

11. Estabilidad corregida

$$Volumen \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.1} = 497.3094 \text{ cm}^3$$

$$Volumen \text{ probeta } \acute{o}ptimo \text{ RAP 2.2} = 493.7914 \text{ cm}^3$$

Tabla 132. Factor de corrección para probetas con % óptimo de asfalto mezcla RAP2

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen,		Correlation Ratio
	in.	mm	
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 ¹ / ₁₆	27.0	5.00
226 to 237	1 ¹ / ₈	28.6	4.55
238 to 250	1 ³ / ₁₆	30.2	4.17
251 to 264	1 ¹ / ₄	31.8	3.85
265 to 276	1 ⁵ / ₁₆	33.3	3.57
277 to 289	1 ³ / ₈	34.9	3.33
290 to 301	1 ⁷ / ₁₆	36.5	3.03
302 to 316	1 ¹ / ₂	38.1	2.78
317 to 328	1 ⁹ / ₁₆	39.7	2.50
329 to 340	1 ⁵ / ₈	41.3	2.27
341 to 353	1 ¹¹ / ₁₆	42.9	2.08
354 to 367	1 ³ / ₄	44.4	1.92
368 to 379	1 ¹³ / ₁₆	46.0	1.79
380 to 392	1 ⁷ / ₈	47.6	1.67
393 to 405	1 ¹⁵ / ₁₆	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 ¹ / ₁₆	52.4	1.39
432 to 443	2 ¹ / ₈	54.0	1.32
444 to 456	2 ³ / ₁₆	55.6	1.25
457 to 470	2 ¹ / ₄	57.2	1.19
471 to 482	2 ⁵ / ₁₆	58.7	1.14
483 to 495	2 ³ / ₈	60.3	1.09
496 to 508	2 ⁷ / ₁₆	61.9	1.04
509 to 522	2 ¹ / ₂	63.5	1.00
523 to 535	2 ⁹ / ₁₆	65.1	0.96
536 to 546	2 ⁵ / ₈	66.7	0.93
547 to 559	2 ¹¹ / ₁₆	68.3	0.89
560 to 573	2 ³ / ₄	69.9	0.86
574 to 585	2 ¹³ / ₁₆	71.4	0.83
586 to 598	2 ⁷ / ₈	73.0	0.81
599 to 610	2 ¹⁵ / ₁₆	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

*Estabilidad corregida probeta óptimo RAP 2.1 = Estabilidad * factor de corrección*

$$Estabilidad\ corregida\ probeta\ óptimo\ RAP\ 2.1 = 4.39\ kN * 1.04$$

$$Estabilidad\ corregida\ probeta\ óptimo\ RAP\ 2.1 = 4.5656\ kN$$

*Estabilidad corregida probeta óptimo RAP 2.2 = Estabilidad * factor de corrección*

$$Estabilidad\ corregida\ probeta\ óptimo\ RAP\ 2.2 = 2.84\ kN * 1.09$$

$$Estabilidad\ corregida\ probeta\ óptimo\ RAP\ 2.2 = 3.0956\ kN$$

$$Estabilidad\ corregida\ probeta\ óptimo\ RAP\ 2\ promedio = \frac{4.5656 + 3.0956}{2}$$

Estabilidad corregida probeta óptimo RAP 2 promedio = 3.8306 kN

Estabilidad corregida probeta óptimo RAP 2 promedio = 861.08 lb

12. Flujo 0.01 in

Después de someter a prueba las probetas de porcentaje óptimo de la mezcla virgen se obtuvieron los siguientes resultados:

Flujo probeta óptimo RAP 2.1 = 18.35 centésimas de pulgada

Flujo probeta óptimo RAP 2.2 = 17.47 centésimas de pulgada

$$*Flujo probeta óptimo RAP 2 promedio = \frac{18.35 + 17.47}{2}*$$

Flujo probeta óptimo RAP 2 promedio = 17.91 centésimas de pulgada

Anexo 7. Ensayo de laboratorio #1 TECNISA a muestra de RAP1



EXTRACCION DE ASFALTO, ANALISIS GRANULOMETRICO	Código RP-CM-20
---	------------------------

Elaborado por JCM	Fecha de Elaboración: 17/06/2023 19/02/2019	Página 1/1	Versión 03
Cargado: Responsable CM	Fecha Última Versión:		Firma Aprobación:

PROYECTO PRACTICA UNITEC

FECHA: 6 de junio de 2023

ANALISIS SOLICITADO POR: _____

DETERMINACION DE PASE N° 200	DETERMINACION DE HUMEDAD
PESO DE MUESTRA ORIGINAL SECA _____	PESO ORIGINAL _____
PESO DE MUESTRA LAVADA SECA _____	PESO SECO _____
PERDIDA POR LAVADO _____	AGUA _____
	% DE HUMEDAD _____

PROCEDIMIENTO: LAVADO SECO

TAMIZ	PESO RETEN.	% RETENIDO	% PASA	% PASA CORREG.
1"				
3/4"				
3/8"				
N° 4				
N° 8				
N° 16				
N° 30				
N° 50				
N° 100				
N° 200				
FONDO				
TOTAL				

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	
PESO DE LA MEZCLA ANTES	562.00
PESO DE LA MEZCLA DESPUES	530.40
PESO DE LA MEZCLA + INCREMENTO	530.70
PESO DEL ASFALTO CONTENIDO	31.30
PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	6.67
PESO DEL FILTRO ANTES	18.90
PESO DEL FILTRO DESPUES	17.20
INCREMENTO DE PESO	0.30

DET. DEL PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS		
DESCRIPCION	PESO	PORCENTAJE
CARAS FRACTURADAS		
CARAS REDONDAS		
TOTALES		100.00%

DETERMINACION DEL EQUIVALENTE DE ARENA			
N°1		X100=	%
N°2		X100=	%
N°3		X100=	%
PROMEDIO			

DESCRIPCION	PORCENTAJE
AFINIDAD DE AGREGADOS CON EL ASFALTO	
AGUA EN EMULSION ASFALTICA	

OBSERVACIONES: _____

ENSAYADO POR _____

APROBADO POR

Anexo 8. Ensayo de laboratorio #2 TECNISA a muestra de RAP1



EXTRACCION DE ASFALTO, ANALISIS GRANULOMETRICO				Código RP-CM-20
Elaborado por JCM	Fecha de Elaboración 13/06/2023	Página 1/1	Versión 03	
Creado por Responsable CM	Fecha Última Versión:		Firma Aprobación	

PROYECTO PRACTICANTE (UNITEC) MUESTRA 1

FECHA: 8 de junio de 2023

ANALISIS SOLICITADO POR: UNITEC

DETERMINACION DE PASE N° 200	DETERMINACION DE HUMEDAD
PESO DE MUESTRA ORIGINAL SECA _____	PESO ORIGINAL _____
PESO DE MUESTRA LAVADA SECA _____	PLSO SECO _____
PERDIDA POR LAVADO _____	AGUA _____
	% DE HUMEDAD _____

PROCEDIMIENTO: LAVADO SECO

TAMIZ	PESO RETEN.	% RETENIDO	% PASA	% PASA CORREG.
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
N° 4				
N° 8				
N° 16				
N° 30				
N° 50				
N° 100				
N° 200				
FONDO				
TOTAL				

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	
PESO DE LA MEZCLA ANTES	1059.10
PESO DE LA MEZCLA DESPUES	997.10
PESO DE LA MEZCLA + INCREMENTO	997.50
PESO DEL ASFALTO CONTENIDO	61.60
PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	5.82
PESO DEL FILTRO ANTES	16.30
PESO DEL FILTRO DESPUES	16.70
INCREMENTO DE PESO	0.40

DET. DEL PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS		
DESCRIPCION	PESO	PORCENTAJE
CARAS FRACTURADAS		
CARAS REDONDAS		
TOTALES		100.00%

DETERMINACION DEL EQUIVALENTE DE ARENA		
N°1	X100=	%
N°2	X100=	%
N°3	X100=	%
PROMEDIO		

DESCRIPCION	PORCENTAJE
AFINIDAD DE AGREGADOS CON EL ASFALTO	
AGUA EN EMULSION ASFALTICA	

OBSERVACIONES: _____

MUESTRA TRAJIDA POR EL INTEREZADO

ENSAYADO POR _____

APROBADO POR

Anexo 9. Ensayo de laboratorio #1 TECNISA a muestra de RAP2



EXTRACCION DE ASFALTO, ANALISIS GRANULOMETRICO				Código RP-CM-20
Elaborado por	JCM	Fecha de Elaboración	12/08/2023	Página 1/1
Cargo:	Responsable CM	Fecha Última Versión		Versión 03 Firma Aprobación

PROYECTO PRACTICANTE (UNITEC) MUESTRA 2

FECHA: 8 de junio de 2023

ANALISIS SOLICITADO POR: UNITEC

DETERMINACION DE PASE N° 200	DETERMINACION DE HUMEDAD
PESO DE MUESTRA ORIGINAL SECA _____	PESO ORIGINAL _____
PESO DE MUESTRA LAVADA SECA _____	PESO SECO _____
PERDIDA POR LAVADO _____	AGUA _____
	% DE HUMEDAD _____

PROCEDIMIENTO: LAVADO SECO

TAMIZ	PESO RETEN.	% RETENIDO	% PASA	% PASA CORREG.
1"				
3/4"				
1/2"				
3/8"				
N° 4				
N° 8				
N° 16				
N° 30				
N° 50				
N° 100				
N° 200				
FONDO				
TOTAL				

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	
PESO DE LA MEZCLA ANTES	1022.70
PESO DE LA MEZCLA DESPUES	984.20
PESO DE LA MEZCLA + INCREMENTO	984.70
PESO DEL ASFALTO CONTENIDO	38.00
PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	3.72
PESO DEL FILTRO ANTES	16.70
PESO DEL FILTRO DESPUES	17.20
INCREMENTO DE PESO	0.50

DET. DEL PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS		
DESCRIPCION	PESO	PORCENTAJE
CARAS FRACTURADAS		
CARAS REDONDAS		
TOTALES		100.00%

DETERMINACION DEL EQUIVALENTE DE ARENA		
N°1	X100+	%
N°2	X100+	%
N°3	X100+	%
PROMEDIO		

DESCRIPCION	PORCENTAJE
AFINIDAD DE AGREGADOS CON EL ASFALTO	
AGUA EN EMULSION ASFALTICA	

OBSERVACIONES: _____

MUESTRA TRAJA POR EL INTEREZADO

ENSAYADO POR _____ APROBADO POR

Anexo 10. Ensayo de laboratorio #2 TECNISA a muestra de RAP2



EXTRACCION DE ASFALTO, ANALISIS GRANULOMETRICO		Código	RP-CM-20
---	--	--------	----------

Elaborado por:	JCM	Fecha de Elaboración:	16/06/2023	Página	1/1	Versión	03
Cargo:	Responsable CM	Fecha última Versión:				Firma Aprobación	

PROYECTO PRACTICA UNITEC MUESTRA 2
FECHA: 6 de junio de 2023
ANALISIS SOLICITADO POR: _____

DETERMINACION DE PASE N° 200

PESO DE MUESTRA ORIGINAL SECA _____
 PESO DE MUESTRA LAVADA SECA _____
 PERDIDA POR LAVADO _____

DETERMINACION DE HUMEDAD

PESO ORIGINAL _____
 PESO SECO _____
 AGUA _____
 % DE HUMEDAD _____

PROCEDIMIENTO: LAVADO SECO

TAMIZ	PESO RETEN.	% RETENIDO	% PASA	% PASA CORREG.
1"				
3/4"				
3/8"				
N° 4				
N° 8				
N° 16				
N° 30				
N° 50				
N° 100				
N° 200				
FONDO				
TOTAL				

DETERMINACION DEL PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	
PESO DE LA MEZCLA ANTES	554.00
PESO DE LA MEZCLA DESPUES	534.40
PESO DE LA MEZCLA + INCREMENTO	534.70
PESO DEL ASFALTO CONTENIDO	19.30
PORCENTAJE DE ASFALTO EN LA MEZCLA	3.48
PESO DEL FILTRO ANTES	17.20
PESO DEL FILTRO DESPUES	17.50
INCREMENTO DE PESO	0.30

DET. DEL PORCENTAJE DE CARAS FRACTURADAS		
DESCRIPCION	PESO	PORCENTAJE
CARAS FRACTURADAS		
CARAS REDONDAS		
TOTALES		100.00%

DETERMINACION DEL EQUIVALENTE DE ARENA		
N°1	X100=	%
N°2	X100=	%
N°3	X100=	%
PROMEDIO		

DESCRIPCION	PORCENTAJE
AFINIDAD DE AGREGADOS CON EL ASFALTO	
AGUA EN EMULSION ASFALTICA	

OBSERVACIONES: _____

ENSAYADO POR _____

APROBADO POR

Anexo 11. Entrevista #1

1. ¿Tiene experiencia en obras de demolición de pavimentos de concreto asfáltico?
R/= Únicamente en excavación de concreto asfáltico para bacheo asfáltico
2. ¿Qué hace la empresa con el desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= En el caso de bacheos asfálticos se utiliza para rellenos de propiedades privadas normalmente. En el caso cuando se escarifica por medios mecánicos se utiliza la máquina fresadora que puede escarificar un espesor determinado y el material que se escarifica se utiliza para la mezcla de subbase (el material se recicla).
3. ¿Existe alguna norma en Honduras sobre la disposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= Sí, en el manual de carreteras, tomo 5, sección 300- Bases y Subbases.
4. ¿Tiene experiencia en reciclaje del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= No
5. ¿Puede mencionar algún proyecto que conozca en el que se haya utilizado concreto asfáltico reciclado?
6. R/= En la ampliación de la CA-5 pero en subbase, para reutilizar el asfalto en mezcla con un nuevo asfalto para pavimentar no conozco si se ha realizado eso en Honduras.
7. ¿Tiene alguna recomendación para la deposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= Sí, para mezcla con materiales para subbase o base y también se puede utilizar mezcla asfáltica recuperada, la mezcla debe tener un porcentaje mínimo de agregado virgen (se sugiere de un 30 a un 70 %). El grado de asfalto nuevo será determinado el ingeniero a fines de su empleo en el diseño de la mezcla. (1)
Información opcional:
8. Nombre: Jorge Cabrera
9. Profesión: Ing. Civil
10. Empresa: Constructora DANIMAR
11. Años de experiencia con pavimentos de concreto asfáltico.: 8 años

Anexo 12. Entrevista #2

1. ¿Tiene experiencia en obras de demolición de pavimentos de concreto asfáltico?

R/=Sí, trabajé en un proyecto hace varios años donde se cambiaba el pavimento, entonces se demolía el pavimento de asfalto existente.

2. ¿Qué hace la empresa con el desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?

R/= En ese proyecto hacían un proceso de reciclaje, lo apartaban al lado de la vía después de demolerlo y lo reciclaban y volvían a fabricar la mezcla asfáltica. He escuchado que en otros proyectos que lo recogen y lo botan en un botadero asignado para ese proyecto.

3. ¿Existe alguna norma en Honduras sobre la disposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?

R/= Yo no he escuchado nunca que exista norma, pero recomendaría investigar en el plan de arbitrios de AMDC. O en la oficina ambiental de la alcaldía.

4. ¿Tiene experiencia en reciclaje del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?

R/= Sí, estuve hace varios años como en el 2005, en un proyecto donde se reciclaba el asfalto.

5. ¿Puede mencionar algún proyecto que conozca en el que se haya utilizado concreto asfáltico reciclado?

R/= En la carretera salida a Danlí, estaban demoliendo el pavimento existente que tenía daños estructurales, lo reciclaban y volvían a fabricar la mezcla y colocan nuevamente la carpeta.

6. ¿Tiene alguna recomendación para la deposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?

R/= Aparte que se puede reciclar, sería importante investigar si se puede usar para relleno y que impacto ambiental puede tener. En ese caso se podría usar de relleno donde no se requiera un alto porcentaje de compactación, pero dependería del impacto ambiental que tenga.

7. Nombre: Julio Baide

8. Profesión: Ing. Civil

9. Empresa:

10. Años de experiencia con pavimentos de concreto asfáltico.: 2

Anexo 13. Entrevista #3

1. ¿Tiene experiencia en obras de demolición de pavimentos de concreto asfáltico?
R/=Sí, como supervisor de un proyecto.
2. ¿Qué hace la empresa con el desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/=En un proyecto la empresa demolía la carpeta existente y la utilizaban como base.
3. ¿Existe alguna norma en Honduras sobre la disposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= No que yo sepa.
4. ¿Tiene experiencia en reciclaje del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= Sí, en reciclaje de la carpeta para utilizarse en base.
5. ¿Puede mencionar algún proyecto que conozca en el que se haya utilizado concreto asfáltico reciclado?
R/= En la carretera de Juticalpa a Catacamas.
6. ¿Tiene alguna recomendación para la deposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R/= La granulometría de la carpeta demolida posee buenas propiedades para ser utilizada como base. En la mayoría de los proyectos este material se considera como desperdicio y se
7. Nombre: Luz Marina Funes Matute
8. Profesión: Ing. Civil
9. Empresa:
10. Años de experiencia con pavimentos de concreto asfáltico: 20

Anexo 14. Entrevista #4

1. ¿Tiene experiencia en obras de demolición de pavimentos de concreto asfáltico?
R//Solo en la supervisión de pavimentos asfálticos
2. ¿Qué hace la empresa con el desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R// Lo envían al botadero
3. ¿Existe alguna norma en Honduras sobre la disposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R// No lo sé, aunque debería de existir
4. ¿Tiene experiencia en reciclaje del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R//Sí
5. ¿Puede mencionar algún proyecto que conozca en el que se haya utilizado concreto asfáltico reciclado?
R//No
6. ¿Tiene alguna recomendación para la deposición del desperdicio del pavimento de concreto asfáltico demolido?
R//Las obras de reciclaje pueden impactar de forma positiva, ya que puede ser un contaminante.
Información opcional:
7. Nombre Juan Carlos Peralta
8. Profesión Ing. Civil
9. Empresa AMDC
10. Años de experiencia con pavimentos de concreto asfáltico. 2

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

**PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR DE DISEÑO
PARA UNA MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO
RECICLADO CON UN PORCENTAJE
DE 5% A 15% DE RAP.**



AUTORES:

**ALEJANDRO JOSÉ BERTETTY LÓPEZ
LUIS FERNANDO CASTILLO ZÚNIGA**

Resumen

Se ha identificado la existencia de una problemática causada por las obras de repavimentación de concreto asfáltico, ya que en estas obras se requiere la demolición de la carpeta asfáltica, lo que genera un residuo de este material, el cual es generalmente depositado en botaderos, por lo que se ha definido una propuesta de diseño para reutilizar residuos de concreto asfáltico en mezclas de concreto asfáltico reciclado (RAP por sus siglas en inglés).

Índice de contenido

I	Introducción	6
II	Alcance	7
III	Referencia	8
3.1	Normativas ASTM implementadas en la guía	8
IV	Procedimiento	9
4.1	Requisitos	9
4.2	Ensayos preliminares	9
4.3	Diseño de concreto asfáltico reciclado	9

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Ejemplo de gráfico de estabilidad vs % de asfalto	18
Ilustración 2. Ejemplo de gráfico Pa vs % de asfalto	18
Ilustración 3. Ejemplo de gráfico Gmb vs % de asfalto	19

Índice de tablas

Tabla 1. Porcentajes de pase de los agregados.	10
Tabla 2. Porcentaje de pase combinado	10
Tabla 3. Verificación de cumplimiento de límites de porcentaje de pase combinado	11
Tabla 4. Pesos por material para una mezcla reciclada de 5% de asfalto	13
Tabla 5. Peso de los agregados vírgenes para mezcla reciclada de 5% de asfalto	13
Tabla 6. Ejemplo de asignación de variables de porcentaje de pesos	16
Tabla 7. Factores de corrección de estabilidad según el volumen de la probeta	17



Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Porcentaje de agregado virgen a utilizar	9
Ecuación 2. Variable "r"	9
Ecuación 3. Porcentaje del nuevo cemento asfáltico	12
Ecuación 4. Porcentaje efectivo de RAP en la mezcla total	12
Ecuación 5. Porcentaje efectivo de nuevo agregado en la mezcla total	12
Ecuación 6. Peso específico bulk Gsb para mezcla con RAP	14
Ecuación 7. Gravedad específica de las pastillas compactadas Gmb	15
Ecuación 8. Gravedad específica de la mezcla suelta Gmm	16
Ecuación 9. Sumatoria de los porcentajes de peso de los agregados áridos	16
Ecuación 10. Peso específico Bulk del agregado total Gsb	16
Ecuación 11. Peso específico efectivo de la mezcla suelta Gse	17
Ecuación 12. Asfalto absorbido por el agregado Pba	17
Ecuación 13. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla Pbe	17
Ecuación 14. Porcentaje de vacíos del agregado mineral VMA	17
Ecuación 15. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada Pa	17
Ecuación 16. Estabilidad corregida	17
Ecuación 17. Porcentaje óptimo de asfalto	19

Índice de anexos

Anexo 1 Tabla Límites de porcentaje de pase recomendados por la normativa ASTM D3515	15
Anexo 2 Cálculo de porcentaje óptimo por método Marshall	15



Lista de siglas y acrónimos



ASTM

American Association of State Highway and Transportation Officials

RAP

Reclaimed Asphalt Pavement



Introducción



El presente procedimiento de mezcla de concreto asfáltico con la incorporación de RAP es una guía que sirve para realizar un diseño controlado de las mezclas asfálticas recicladas. Por medio de este procedimiento, se pretende eliminar los diseños de mezcla asfáltica empíricos, los cuales, en su mayoría son utilizados en obras de pavimentación al solamente cumplir con las especificaciones indicadas para su uso. Al seguir paso a paso la presente guía, se consigue obtener un diseño base con resultados satisfactorios la cual puede ser posteriormente modificada para asemejarse más a las propiedades deseadas, de este modo se evitan las iteraciones empíricas en el diseño de este tipo de mezclas.

02 Alcance

Al utilizar este procedimiento, el usuario de la guía será capaz de incorporar de 5% a 15% de residuo de concreto asfáltico de la cantidad total a una mezcla asfáltica virgen, la cual se espera que tendrá una reducción aproximada en estabilidad de 7% a 17% (porcentajes de reducción obtenidos al implementar 15% de RAP) comparada a una 100% virgen. La metodología del diseño consiste en diseñar una mezcla virgen por medio del método Marshall que cumpla con

los criterios del Instituto del Asfalto (U.S.A.) para su uso en carpeta del tipo de tránsito al que se desee someter (transito liviano, mediano, o pesado). Al obtener la dosificación de los agregados que cumpla con los criterios deseados, se implementa un porcentaje entre 5% a 15% de RAP a la mezcla y se realizan los cálculos correspondientes integrados en el presente procedimiento para el diseño de concreto asfáltico reciclado.



PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR DE DISEÑO PARA UNA MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO CON UN PORCENTAJE DE 5% A 15% DE RAP.

7.

03 Referencia

La presente guía se basa en el procedimiento "Hot Mix Asphalt Recycling" utilizado por el U.S. Department of Transportation of Federal Highway Administration la cual se rige por el Instituto del Asfalto. Es considerada una práctica estándar de reciclaje en carpeta de rodadura en 40 estados de los Estados Unidos de América. La guía toma como referencia los ensayos regidos por normativas ASTM, el método Marshall para elaboración de probetas de concreto asfáltico y los cálculos respectivos a este método. Por último, se utilizan las ecuaciones proporcionadas por el Instituto del asfalto para el cálculo de porcentajes requeridos de cada agregado de la mezcla.

3.1 NORMATIVAS ASTM IMPLEMENTADAS EN LA GUÍA:

ASTM D422: Ensayo de Granulometría

ASTM C29: Ensayo de peso específico

ASTM C127: Ensayo gravedad específica

ASTM D2172: Porcentaje de asfalto en la mezcla, método A (centrifuga)

ASTM D1559: Método Marshall



8.

PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR DE DISEÑO PARA UNA MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO CON UN PORCENTAJE DE 5% A 15% DE RAP.

04 Procedimiento

■ Ensayo de granulometría al agregado del RAP.

■ Ensayo de gravedad específica al RAP

■ Diseño de mezcla virgen por método Marshall

Se recomienda realizar los ensayos en el orden que se encuentran anteriormente.

El procedimiento consiste en cinco segmentos secuenciales, los cuales cuentan de pasos correspondientes que se deben completar y verificar que se cumplan las especificaciones correspondientes antes de continuar al siguiente segmento.

4.1 DISEÑO DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

Obtenidos los resultados de los ensayos preliminares se procede a realizar los cinco segmentos del procedimiento de diseño de concreto asfáltico reciclado.

4.2 ENSAYOS PRELIMINARES

Antes de realizar el diseño de la mezcla de concreto asfáltico se deben realizar ensayos preliminares para la evaluación de los agregados a utilizar. Los resultados de estos ensayos serán utilizados en los pasos de diseño que se indican en la guía.

Los ensayos requeridos a realizar son los siguientes:

■ Ensayo de granulometría al agregado grueso y fino.

■ Ensayo de peso específico al agregado grueso y fino.

■ Ensayo de contenido de asfalto a la muestra de RAP.

4.3 DISEÑO DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO

Obtenidos los resultados de los ensayos preliminares se procede a realizar los seis pasos del procedimiento de diseño de concreto asfáltico reciclado.

1. VERIFICACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE PASE DE LOS AGREGADOS Y EL RAP

Se debe verificar que la combinación de porcentajes de pase de los agregados vírgenes y agregado del RAP cumpla con los límites establecidos por la normativa ASTM D3515 para el tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " como se observa en la Tabla 1.

Definición de porcentaje de RAP a utilizar (5%-15%)

Se requiere definir el porcentaje de RAP que se pretende utilizar en la mezcla reciclada, ya que es necesario asignar la variable "r" al porcentaje de agregado virgen a utilizar.

$$\text{Porcentaje de agregado virgen} = 100\% - \text{Porcentaje de RAP}$$

Ecuación 1. Porcentaje de agregado virgen a utilizar

$$r = \text{Porcentaje de agregado virgen}$$

Ecuación 2. Variable "r"

Tabla 1. Porcentajes de pase de los agregados.

TAMIZ	TAMAÑO DEL TAMIZ MM	PORCENTAJE DE PASE	
		AGREGADO RAP	NUEVO AGREGADO
1"	25	100.00	100.00
3/4"	19	100.00	98.17
3/8"	9.5	89.87	66.51
#4	4.75	69.46	50.75
#8	2.36	50.85	46.99
#50	0.3	18.70	12.44
#200	0.075	8.20	3.08

Luego, se obtiene el agregado combinado de la siguiente forma.

Tabla 2. Porcentaje de pase combinado

TAMIZ	TAMAÑO DEL TAMIZ MM	PORCENTAJE DE PASE		
		15 % AGREGADO RAP	85 % NUEVO AGREGADO	AGREGADO COMBINADO
1"	25	$100 \times 15\% = 15$	$100 \times 85\% = 85$	$15 + 85 = 100$
3/4"	19	$100 \times 15\% = 15$	$98.17 \times 85\% = 83.44$	$15 + 83.44 = 98.44$
3/8"	9.5	$89.87 \times 15\% = 10.42$	$66.51 \times 85\% = 56.53$	$10.42 + 56.53 = 70.01$
#4	4.75	$69.46 \times 15\% = 10.42$	$50.75 \times 85\% = 43.13$	$10.42 + 43.13 = 53.55$
#8	2.36	$50.85 \times 15\% = 7.63$	$46.99 \times 85\% = 39.95$	$7.63 + 39.95 = 47.57$
#50	0.3	$18.70 \times 15\% = 2.8$	$12.44 \times 85\% = 10.57$	$2.8 + 10.57 = 13.38$
#200	0.075	$8.20 \times 15\% = 1.23$	$8.08 \times 85\% = 2.62$	$1.23 + 2.62 = 3.85$

Por último, se verifica que el porcentaje de pase combinado se encuentre dentro de los límites establecidos como se muestra a continuación.

Tabla 3. Verificación de cumplimiento de límites de porcentaje de pase combinado

TAMIZ	TAMAÑO DEL TAMIZ MM	PORCENTAJE DE PASE	
		LÍMITES DE % DE PASE	% DE PASE COMBINADO
1"	25	100	100.00
3/4"	19	90-100	98.44
3/8"	9.5	56-80	70.01
#4	4.75	35-65	53.55
#8	2.36	23-49	47.57
#50	0.3	5-19	13.38
#200	0.075	2-8	3.85

De no cumplir los límites de % de pase, se deberá modificar los % ideales de los agregados (grava, arena, y filler) en el diseño de la mezcla virgen hasta que el % de pase combinado cumpla. De lo contrario la combinación del RAP con el agregado seleccionado no es compatible para cumplir los límites sugeridos por la norma.

2. CÁLCULO DE PORCENTAJE ÓPTIMO APROXIMADO DE LA MEZCLA

El porcentaje óptimo aproximado de la mezcla se asume que es el mismo porcentaje óptimo de la mezcla de concreto asfáltico virgen.

Se requiere realizar el ensayo de probetas de concreto asfáltico por medio del método Marshall con el diseño de mezclas obtenido que cumpla con el segmento anterior. Se deben realizar los cálculos correspondientes para la obtención del porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla virgen. Se recomienda realizar probetas con el contenido óptimo de asfalto para obtener

resultados reales y modificar el diseño de la mezcla si es necesario para cumplir los requisitos de propiedades deseadas.

3. DEFINICIÓN DE LOS PORCENTAJES DE ASFALTO DE PRUEBA

Los porcentajes de asfalto de prueba se definen en incrementos a ambos lados de 0.5% del porcentaje óptimo aproximado, con un total de 5 porcentajes para las pruebas.

Ejemplo de porcentajes de prueba para un porcentaje óptimo aproximado de 6.27%

5%, 5.5%, 6%, 6.5%, y 7%

4. DEFINICIÓN DE LOS PORCENTAJES DE LOS AGREGADOS DE LA MEZCLA Y SUS PESOS

Primeramente, se deben calcular los porcentajes de los agregados en base a un 100% de la mezcla. Por medio de las siguientes ecuaciones, se obtienen los porcentajes de los agregados de las mezclas.

$$P_{nb} = \frac{(100^2 - rP_{sb})P_b}{100 * (100 - P_{sb})} - \frac{(100 - r)P_{sb}}{100 - P_{sb}}$$

Ecuación 3. Porcentaje del nuevo cemento asfáltico

Donde:

Pnb: Porcentaje de cemento asfáltico adicional

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

Psb: Contenido de asfalto en el RAP

$$P_{sm} = \frac{100(100 - r)}{100 - P_{sb}} - \frac{(100 - r)P_b}{100 - P_{sb}}$$

Ecuación 4. Porcentaje efectivo de RAP en la mezcla total

Donde:

Psm: Porcentaje efectivo de RAP

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

Psb: Contenido de asfalto en el RAP



12.

PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR DE DISEÑO PARA UNA MEZCLA DE CONCRETO ASFÁLTICO RECICLADO CON UN PORCENTAJE DE 5% A 15% DE RAP.

$$P_{ns} = r - \frac{rP_b}{100}$$

Ecuación 5. Porcentaje efectivo de nuevo agregado en la mezcla total

Donde:

Pns: Porcentaje efectivo de nuevo agregado

r: Porcentaje de agregado nuevo de la mezcla total

Para verificar que los cálculos realizados sean correctos, la sumatoria de estos tres datos anteriores debe ser igual a 100.

Se deben realizar los cálculos anteriores para cada uno de los porcentajes de asfalto de prueba. Por lo tanto, se deben repetir un total de cinco veces cada uno.

Se recomienda simplificar las ecuaciones en función de P_b para facilitar los cálculos.

 Pesos de los agregados

Al obtener los porcentajes de los agregados de la mezcla, se debe obtener los pesos correspondientes para cada material a utilizar para la mezcla en base a una probeta de 1200 gramos.

Se muestra a continuación un ejemplo de cálculo para una mezcla con 5% de asfalto.

Tabla 4. Pesos por material para una mezcla reciclada de 5% de asfalto

5% DE ASFALTO		
MATERIAL	% POR PESO DE LA MEZCLA	PESOS POR MATERIAL (g)
Asfalto adicional, Pnb	4.14	49.66
RAP, Psm	15.11	181.34
Nuevo agregado, Pns	80.75	969.00
Total	100.00	1200.0

Posteriormente, se requiere obtener los pesos requeridos de grava, arena, y filler. Se utilizan los mismos % ideales de agregados utilizados en la mezcla virgen para calcular los pesos. En este caso los porcentajes utilizados son de 48-48-4 %. Los cálculos se realizan en base al total de peso de la variable Pns.

Tabla 5. Peso de los agregados vírgenes para mezcla reciclada de 5% de asfalto

NUEVO AGREGADO PARA 5% DE ASFALTO		969 g
MATERIAL	% POR PESO DE LA MEZCLA	PESOS POR MATERIAL (g)
Grava	48	465.12
Arena	48	465.12
Filler	4	38.76
Total	100	969

5. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO

Por medio de los datos obtenidos anteriormente de pesos de los materiales, se deben realizar probetas con cada uno de los porcentajes de asfalto de prueba y someterlas a los ensayos correspondientes según el método Marshall. Se recomienda realizar 3 probetas para cada porcentaje de asfalto de prueba.

Se deben obtener los datos de dimensiones, peso al aire, y peso sumergido de las probetas, carga y deformación de probetas al ser sometidas a la máquina de estabilidad Marshall, por último, los datos de peso específico de la mezcla suelta.

Con estos datos se realiza el cálculo de porcentaje óptimo por medio de los pasos establecidos por el método Marshall encontrados en anexos. Para el cálculo de peso específico bulk (G_{sb}) se modificó la ecuación para incorporar el dato de gravedad específica del RAP.

$$G_{sb} = \left[\frac{P1 + P2 + P3 + P4}{\left(\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} + \frac{P4}{G4}\right)} \right]$$

Ecuación 6. Peso específico bulk G_{sb} para mezcla con RAP

Donde:

P4: Porcentaje por peso de la mezcla del RAP

G4: Gravedad específica del RAP

Con los datos obtenidos por medio de los cálculos del método Marshall se procede a realizar las siguientes gráficas.

- Estabilidad vs % de asfalto
- Pa vs % de asfalto
- Gmb vs % de asfalto

Se selecciona el porcentaje de asfalto correspondiente a la estabilidad y Gmb máximo, así como el porcentaje de asfalto correspondiente a 4% de vacíos Pa. Se realiza el promedio de los tres porcentajes de asfalto obtenidos, éste promedio será el porcentaje óptimo de la mezcla.

5.1. ELABORACIÓN DE PROBETA DE MEZCLA CON PORCENTAJE ÓPTIMO DE ASFALTO

Se deben realizar tres probetas con el porcentaje óptimo de asfalto obtenido y someterlas a los ensayos referentes al método Marshall. Es necesario repetir el segmento #4 para obtener los porcentajes y pesos de los materiales correspondientes al porcentaje óptimo de asfalto.

Por último, se realizan los cálculos del método Marshall para obtener los resultados de las propiedades de la mezcla diseñada.



Anexos

Anexo 1 Tabla Límites de porcentaje de pase recomendados por la normativa ASTM D3515

Abertura de malla	Mezclas cerradas								
	Tamaño máximo nominal del agregado								
	2 in (50mm)	1 ½ in. (37.5 mm)	1 in. (25.0mm)	¾ in. (19.0mm)	½ in. (12.5mm)	3/8 in. (9.5mm)	No. 4 (4.75mm)	No. 8 (2.36mm)	No. 15 (1.18mm)
Graduaciones para mezclas de agregados grueso, fino y filler									
2 ½ in. (53mm)	100	-	-	-	-	-	-	-	-
2 in. (60mm)	90-100	100	-	-	-	-	-	-	-
1 ½ in. (37.5mm)	-	90-100	100	-	-	-	-	-	-
1 in. (25.0mm)	60-80	-	90-100	100	-	-	-	-	-
¾ in. (19.0mm)	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-	-
½ in. (12.5mm)	35-65	-	56-80	-	90-100	100	-	-	-
3/8 in. (9.5mm)	-	-	-	56-80	-	90-100	100	-	-
No. 4 (4.75mm)	17-47	23-53	29-59	35-65	44-74	65-85	80-100	-	100
No. 8 (2.36mm)	10-36	15-41	19-45	23-49	26-56	32-67	65-100	-	95-100
No. 15 (1.18mm)	-	-	-	-	-	-	40-80	-	85-100
No. 30 (600µm)	-	-	-	-	-	-	35-65	-	70-95
No. 50 (300µm)	3-15	4-16	5-17	5-19	5-21	7-23	7-40	-	45-75
No. 100 (150µm)	-	-	-	-	-	-	3-20	-	20-40
No. 200 (75µm)	0-6	0-6	1-7	2-8	2-10	2-10	2-10	-	9-20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la mezcla									
	2-7	3-8	3-9	4-10	4-11	5-12	6-12	7-12	8-12

Anexo 2 Cálculo de porcentaje óptimo por método Marshall

1. Cálculo de gravedad específica de las pastillas compactadas (G_{mb})

Donde:

G_{mb} : Gravedad específica de las pastillas compactadas

W_s : Peso sumergido (g)

W_a : Peso al aire (g)

$$G_{mb} = \frac{W_a}{W_a - W_s} * \frac{1 \text{ gr}}{\text{cm}^3} = \text{gr/cm}^3$$

Ecuación 7. Gravedad específica de las pastillas compactadas G_{mb}

2. Cálculo de gravedad específica de la mezcla suelta (Gmm)

$$Gmm = \frac{Wm}{W_{p+a} + Wm - W_{p+a+m}} = gr/cm^3$$

Ecuación 8. Gravedad específica de la mezcla suelta Gmm

Donde:

Gmm: Gravedad específica de la mezcla suelta

Wm: Peso del material

Wp+a: Peso de picnómetro + agua

Wp+a+m: Peso de picnómetro + agua + material

3. Cálculo de peso específico de los agregados

Se asignan las siguientes variables a los resultados de pesos específicos de los agregados

G1: Peso específico de la grava

G2: Peso específico de la arena

G3: Peso específico del filler = 2.650

Gb: Peso específico del cemento asfáltico = 1.010

4. Tabla de asignación de variables de los porcentajes de peso de los materiales

Tabla 6. Ejemplo de asignación de variables de porcentaje de pesos

MATERIAL	% POR PESO DEL AGREGADO	% POR PESO DE LA MATERIAL (g)	DATO
Asfalto	4%	$\frac{4}{104} * 100 = 3.84$	Pb
Grava	48.00%	$\frac{48}{104} * 100 = 46.15$	P1
Arena	48.00%	$\frac{48}{104} * 100 = 46.15$	P2
Filler	4.00%	$\frac{48}{104} * 100 = 3.84$	P3
Total	104%	100%	

$$Ps = P1 + P2 + P3$$

Ecuación 9. Sumatoria de los porcentajes de peso de los agregados áridos

5. Cálculo de peso específico Bulk del agregado total (Gsb)

$$Gsb = \left[\frac{P1 + P2 + P3}{\left(\frac{P1}{G1} + \frac{P2}{G2} + \frac{P3}{G3} \right)} \right]$$

Ecuación 10. Peso específico Bulk del agregado total Gsb

6. Cálculo de peso específico efectivo de la mezcla suelta (Gse)

$$Gse = \left[\frac{100 - Pb}{\left(\frac{100}{Gmm} - \frac{Pb}{Gb} \right)} \right]$$

Ecuación 11. Peso específico efectivo de la mezcla suelta Gse

7. Cálculo de asfalto absorbido por el agregado (Pba)

$$Pba = 100 * \left[\frac{Gse - Gsb}{Gsb * Gse} \right] * Gb$$

Ecuación 12. Asfalto absorbido por el agregado Pba

8. Cálculo de contenido efectivo de asfalto en la mezcla (Pbe)

$$Pbe = Pb - \frac{Pba}{100} * Ps$$

Ecuación 13. Contenido efectivo de asfalto en la mezcla Pbe

9. Cálculo de porcentaje de vacíos del agregado mineral (VMA)

$$VMA = 100 - \frac{Gmb * Ps}{Gsb}$$

Ecuación 14. Porcentaje de vacíos del agregado mineral VMA

10. Cálculo de porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada (Pa)

$$Pa = 100 * \frac{Gmm - Gmb}{Gmm}$$

Ecuación 15. Porcentaje de vacíos llenos de aire de la mezcla compactada Pa

11. Estabilidad corregida

$$Estabilidad\ corregida = Estabilidad * factor\ de\ corrección$$

Ecuación 16. Estabilidad corregida

Tabla 7. Factores de corrección de estabilidad según el volumen de la probeta

Volume of Specimen, cm ³	Approximate Thickness of Specimen,		Corre- ction Ratio
	in.	mm	
200 to 213	1	25.4	5.56
214 to 225	1 ¹ / ₁₆	27.0	5.00
226 to 237	1 ¹ / ₈	28.6	4.55
238 to 250	1 ¹ / ₄	30.2	4.17
251 to 264	1 ¹ / ₂	31.8	3.85
265 to 276	1 ³ / ₁₆	33.3	3.57
277 to 289	1 ¹ / ₂	34.9	3.33
290 to 301	1 ⁷ / ₁₆	36.5	3.03
302 to 316	1 ¹ / ₂	38.1	2.78
317 to 328	1 ⁹ / ₁₆	39.7	2.50
329 to 340	1 ⁵ / ₈	41.3	2.27
341 to 353	1 ¹¹ / ₁₆	42.9	2.08
354 to 367	1 ³ / ₄	44.4	1.92
368 to 379	1 ¹³ / ₁₆	46.0	1.79
380 to 392	1 ⁷ / ₈	47.6	1.67
393 to 405	1 ¹⁵ / ₁₆	49.2	1.56
406 to 420	2	50.8	1.47
421 to 431	2 ¹ / ₁₆	52.4	1.39
432 to 443	2 ¹ / ₈	54.0	1.32
444 to 456	2 ³ / ₁₆	55.6	1.25
457 to 470	2 ¹ / ₄	57.2	1.19
471 to 482	2 ³ / ₈	58.7	1.14
483 to 495	2 ¹ / ₂	60.3	1.09
496 to 508	2 ⁵ / ₁₆	61.9	1.04
509 to 522	2 ¹ / ₂	63.5	1.00
523 to 535	2 ⁷ / ₁₆	65.1	0.96
536 to 546	2 ³ / ₄	66.7	0.93
547 to 559	2 ¹¹ / ₁₆	68.3	0.89
560 to 573	2 ³ / ₄	69.9	0.86
574 to 585	2 ¹³ / ₁₆	71.4	0.83
586 to 598	2 ⁷ / ₈	73.0	0.81
599 to 610	2 ¹⁵ / ₁₆	74.6	0.78
611 to 625	3	76.2	0.76

12. Cálculo de porcentaje óptimo de asfalto

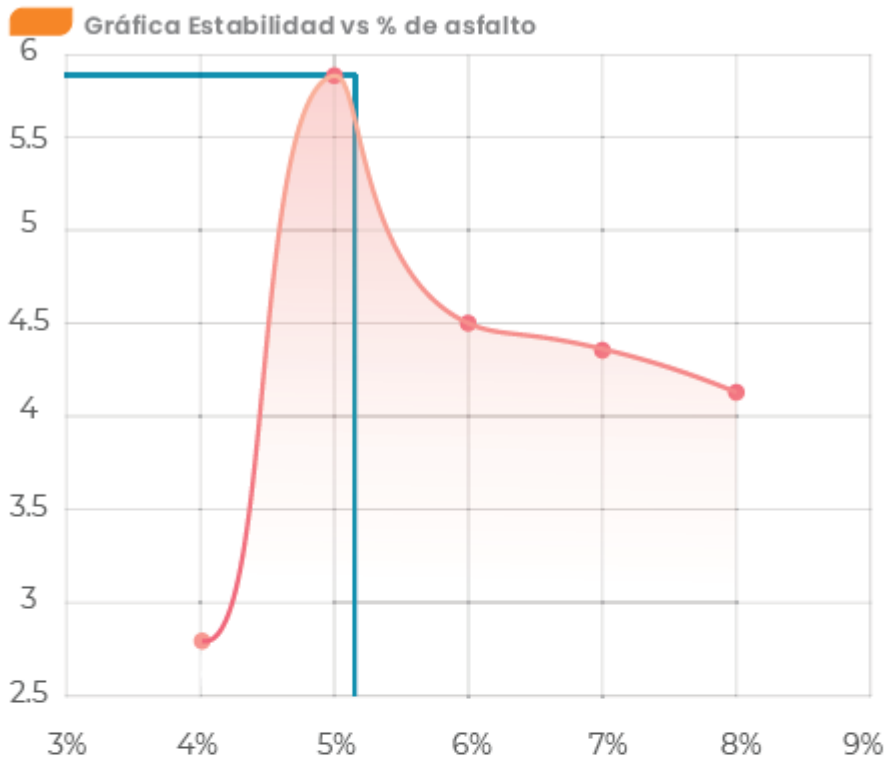


Ilustración 1. Ejemplo de gráfico de estabilidad vs % de asfalto

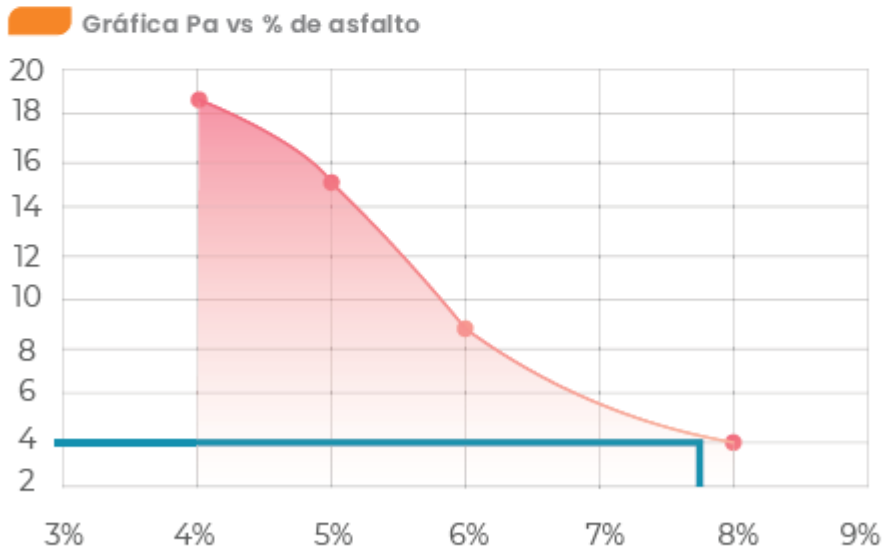


Ilustración 2. Ejemplo de gráfico Pa vs % de asfalto

Gráfica Gmb vs % de asfalto

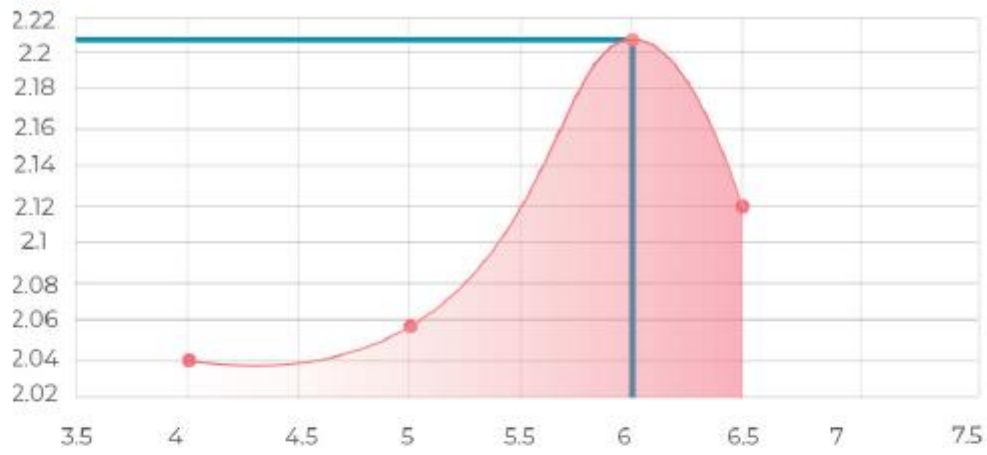


Ilustración 3. Ejemplo de gráfico Gmb vs % de asfalto

Cálculo de porcentaje óptimo de asfalto de una mezcla con agregado

$$\% \text{ óptimo de asfalto} = \frac{\%_1 + \%_2 + \%_3}{3}$$

Ecuación 17. Porcentaje óptimo de asfalto

Anexo 16. Cronograma

Tabla 133. Cronograma semanas 1-2

ACTIVIDAD	EJECUTADO								EJECUTADO						
	SEMANA 1								SEMANA 2						
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	
PORTADA															
AUTORIZACIÓN															
HOJA DE FIRMAS															
RESUMEN EJECUTIVO															
ABSTRACT															
ÍNDICE DE CONTENIDO															
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES															
ÍNDICE DE TABLAS															
ÍNDICE DE ECUACIONES															
ÍNDICE DE ANEXOS															
SIGLAS															
GLOSARIO															
I. INTRODUCCIÓN															
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA															
III. MARCO TEÓRICO															
IV. METODOLOGÍA															
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS															
V. CONCLUSIONES															
VI. RECOMENDACIONES															
BIBLIOGRAFÍA															
ANEXOS															
ENTREGABLES MEDIO PERIODO															
INFORME MEDIO PERIODO (EN SEMANA 5)															
PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)															
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)															
ENSAYO Y CONFERENCIA 1 (EN SEMANA 5)															
ENTREGABLES FINALES															
ENSAYO Y CONFERENCIA 2 (EN SEMANA 10)															
ENTREGA CALIFICACIÓN CURSO HABILIDADES EN PRESENTACIONES															
PLANOS O PA.PER (EN SEMANA 10)															
INFORME FINAL (EN SEMANA 10)															
PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)															
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)															

Tabla 134. Cronograma semanas 3-4

ACTIVIDAD	EJECUTADO								EJECUTADO						
	SEMANA 3								SEMANA 4						
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	
PORTADA															
AUTORIZACIÓN															
HOJA DE FIRMAS															
RESUMEN EJECUTIVO															
ABSTRACT															
ÍNDICE DE CONTENIDO															
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES															
ÍNDICE DE TABLAS															
ÍNDICE DE ECUACIONES															
ÍNDICE DE ANEXOS															
SIGLAS															
GLOSARIO															
I. INTRODUCCIÓN															
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA															
III. MARCO TEÓRICO															
IV. METODOLOGÍA															
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS															
V. CONCLUSIONES															
VI. RECOMENDACIONES															
BIBLIOGRAFÍA															
ANEXOS															
ENTREGABLES MEDIO PERIODO															
INFORME MEDIO PERIODO (EN SEMANA 5)															
PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)															
GUION DE LA PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)															
ENSAYO CONFERENCIA 1 (EN SEMANA 5)															
ENTREGABLES FINALES															
ENSAYO CONFERENCIA 2 (EN SEMANA 10)															
ENTREGA CALIFICACIÓN CURSO HABILIDADES EN PRESENTACIONES															
PLANOS O PAPER (EN SEMANA 10)															
INFORME FINAL (EN SEMANA 10)															
PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)															
GUION DE LA PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)															

Tabla 135. Cronograma semanas 4-6

ACTIVIDAD	EJECUTADO							PROGRAMADO						
	SEMANA 5							SEMANA 6						
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
PORTADA														
AUTORIZACIÓN														
HOJA DE FIRMAS														
RESUMEN EJECUTIVO														
ABSTRACT														
ÍNDICE DE CONTENIDO														
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES														
ÍNDICE DE TABLAS														
ÍNDICE DE ECUACIONES														
ÍNDICE DE ANEXOS														
SIGLAS														
GLOSARIO														
I. INTRODUCCIÓN														
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA														
III. MARCO TEÓRICO														
IV. METODOLOGÍA														
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS														
V. CONCLUSIONES														
VI. RECOMENDACIONES														
BIBLIOGRAFÍA														
ANEXOS														
ENTREGABLES MEDIO PERIODO														
INFORME MEDIO PERIODO (EN SEMANA 5)														
PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
GUION DE LA PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
ENSAYO CONFERENCIA 1 (EN SEMANA 5)														
ENTREGABLES FINALES														
ENSAYO CONFERENCIA 2 (EN SEMANA 10)														
ENTREGA CALIFICACIÓN CURSO HABILIDADES EN PRESENTACIONES														
PLANOS O PAPER (EN SEMANA 10)														
INFORME FINAL (EN SEMANA 10)														
PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														
GUION DE LA PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														

Tabla 136. Cronograma semanas 7-8

ACTIVIDAD	PROGRAMADO							PROGRAMADO						
	SEMANA 7							SEMANA 8						
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
PORTADA														
AUTORIZACIÓN														
HOJA DE FIRMAS														
RESUMEN EJECUTIVO														
ABSTRACT														
ÍNDICE DE CONTENIDO														
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES														
ÍNDICE DE TABLAS														
ÍNDICE DE ECUACIONES														
ÍNDICE DE ANEXOS														
SIGLAS														
GLOSARIO														
I. INTRODUCCIÓN														
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA														
III. MARCO TEÓRICO														
IV. METODOLOGÍA														
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS														
V. CONCLUSIONES														
VI. RECOMENDACIONES														
BIBLIOGRAFÍA														
ANEXOS														
ENTREGABLES MEDIO PERIODO														
INFORME MEDIO PERIODO (EN SEMANA 5)														
PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
ENSAYO CONFERENCIA 1 (EN SEMANA 5)														
ENTREGABLES FINALES														
ENSAYO CONFERENCIA 2 (EN SEMANA 10)														
ENTREGA CALIFICACIÓN CURSO HABILIDADES EN PRESENTACIONES														
PLANOS O PAPER (EN SEMANA 10)														
INFORME FINAL (EN SEMANA 10)														
PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														

Tabla 137. Cronograma semanas 9-10

ACTIVIDAD	PROGRAMADO							PROGRAMADO						
	SEMANA 9							SEMANA 10						
	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO	DOMINGO
PORTADA														
AUTORIZACIÓN														
HOJA DE FIRMAS														
RESUMEN EJECUTIVO														
ABSTRACT														
ÍNDICE DE CONTENIDO														
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES														
ÍNDICE DE TABLAS														
ÍNDICE DE ECUACIONES														
ÍNDICE DE ANEXOS														
SIGLAS														
GLOSARIO														
I. INTRODUCCIÓN														
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA														
III. MARCO TEÓRICO														
IV. METODOLOGÍA														
V. RESULTADOS Y ANÁLISIS														
V. CONCLUSIONES														
VI. RECOMENDACIONES														
BIBLIOGRAFÍA														
ANEXOS														
ENTREGABLES MEDIO PERIODO														
INFORME MEDIO PERIODO (EN SEMANA 5)														
PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN (EN SEMANA 5)														
ENSAYO Y CONFERENCIA 1 (EN SEMANA 5)														
ENTREGABLES FINALES														
ENSAYO Y CONFERENCIA 2 (EN SEMANA 10)														
ENTREGA CALIFICACIÓN CURSO HABILIDADES EN PRESENTACIONES														
PLANOS O PAPER (EN SEMANA 10)														
INFORME FINAL (EN SEMANA 10)														
PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														
GUIÓN DE LA PRESENTACIÓN FINAL (EN SEMANA 10)														