



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Innovación en el proceso de diseño de mezclas asfálticas
en caliente para la ciudad de Loja, en obras de
pavimentación urbana**

Tesis para optar el Grado de
Máster en Ingeniería Civil con mención en Vial

Julio César Novillo Jiménez

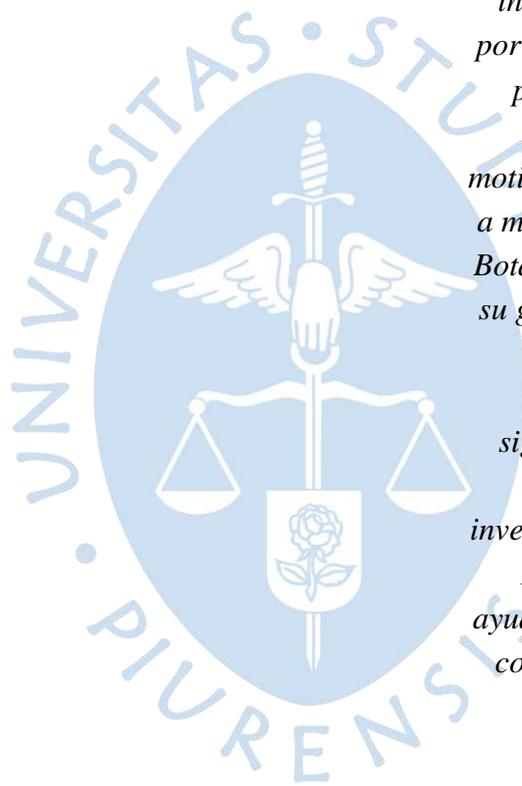
Asesor(es):
Dr. Ing. Hugo Gerardo Botasso Campagno

Piura, marzo del 2022



Dedicatoria:

El presente tema de investigación se lo dedico a Dios por guiarme y brindarme la fuerza para superarme cada día, a mis familiares por sus consejos y motivación completar mis estudios, a mi tutor: Dr. Ing. Hugo Gerardo Botasso Campagno por contar con su guía y apoyo para el desarrollo de la tesis, puesto que sus conocimientos han aportado significativamente para terminar satisfactoriamente con la investigación. Al Ing. Rolando Vila Romaní, PhD por ofrecerme su ayuda con criterios y experiencias, como también por facilitarme los equipos de laboratorio de la Universidad de Santiago de Guayaquil para realizar los ensayos





Resumen

El presente trabajo consiste en implementar la tecnología Superpave en las HMA a diseños habituales elaborados en la ciudad de Loja por el método Marshall, con la finalidad de aplicar especificaciones de control para caracterización de agregados, estructuras granulares y parámetros volumétricos. Así mismo, como medida de exigencia se utiliza el valor del módulo de rigidez que se obtiene del equipo NAT, para determinar el nivel de desempeño que se encuentran los diseños. El proceso comienza con la recolección del agregado mineral y elaboración de testigos de mezclas asfálticas recién producidas en la planta de asfalto del Municipio de Loja, y al evaluar todos los aspectos técnicos se detecta que la gráfica de esqueleto granular se forma por arriba de zona restringida, así mismo aspectos de angularidad en la estructura mineral fina y gruesa, deletéreo azul de metileno y parámetros volumétricos no cumplen exigencias para las dos metodologías, como también al contrastar el comportamiento de los pavimentos bituminosos producidos en la ciudad de Loja bajo el módulo de rigidez estos se encuentran a un nivel inadecuado. Esto hace notar que las HMA que se producen actualmente en la ciudad de Loja no son las adecuadas, porque presentan problemas de desempeño en su estructura granular, características del material mineral y también propiedades volumétricas, por tal razón este tipo de diseños deben modificarse para cumplir exigencias reales de la zona.

Al realizar las correcciones de las propiedades del agregado mineral y esqueleto granular bajo la metodología Superpave, se plantean tres diseños (A, B, C) con granulometría diferentes y se determina que las graduaciones que tienden bajo la línea de máxima densidad (A, B) poseen un nivel de desempeño tolerable. Este comportamiento puede presentarse debido a que no posee valores altos respecto a la angulosidad del agregado fino y bajo este criterio las mezclas asfálticas son susceptibles a deformación permanente; sin embargo, al aplicar aspectos de control de sistema Superpave en las HMA, se logra mejorar el comportamiento del pavimento flexible con los escenarios propuestos A y B, en relación a los diseños producidos en el Municipio de Loja.

Finalmente, se determina que el aporte del sistema Superpave a la innovación de las HMA para la ciudad de Loja, ha permitido diseñar la estructura granular C, en la cual constan mejoras respecto a las características del agregado mineral y distribución de los tamaños del esqueleto granular, proporcionando parámetros volumétricos adecuados; como también, cumple con la exigencia de comportamiento a nivel satisfactorio bajo módulo de rigidez y este tipo de mezcla, es ideal para la implementación en la ciudad de Loja.



Prefacio

Las fisuras o grietas que se producen frecuentemente en las estructuras flexibles son generadas principalmente por las cargas de tránsito que se comportan diferente a las condiciones actuales. Entre las causas que influyen en el desempeño del pavimento tenemos: susceptibilidad térmica, pérdida de cohesión – adherencia por efectos de las temperaturas intermedias y envejecimiento por la oxidación de asfalto, propiedades que no son consideradas en el método Marshall utilizado comúnmente en el Ecuador. Por tal situación se ha visto la necesidad de innovar al diseño de mezclas asfálticas locales con la incorporación del esqueleto granular y otros aspectos técnicos del sistema Superpave a diseños habituales de la ciudad de Loja.

Esta investigación tiene como finalidad determinar las propiedades del agregado mineral utilizado para el diseño de las HMA producidas en la ciudad de Loja, como también evaluar el desempeño de los aspectos volumétricos del pavimento flexible y compararlos con especificaciones tanto locales, como del método Marshall y Superpave. Así mismo, proponer con dichos agregados una estructura granular ideal y contenido óptimo de asfalto que permitan obtener un nivel de exigencia satisfactorio mediante la prueba del módulo de rigidez, que es una herramienta para control de desempeño en pavimentos asfálticos, como también promueve la asignación de límites en el esqueleto granular y ligante asfáltico para describir posibles problemas que puedan suscitarse cuando se exceda estos rangos establecidos.

La estructura granular es uno de los criterios que utiliza la metodología Superpave, donde emplea dos conceptos importantes como son los puntos de control y zona restringida. Así mismo, se encuentra las exigencias de calidad en la estructura mineral por intermedio de la evaluación de las características de consenso y de origen, que aportan significadamente a la revisión del control del agregado a utilizar en la mezcla asfáltica y por último están las características del ligante asfáltico que permiten determinar propiedades físico-químicas del cementante. En cambio, para poseer una medida de exigencia se encuentra el valor de módulo de rigidez, que describe el nivel de desempeño de una mezcla asfáltica recién producida en planta.

En la elaboración de la tesis se obtiene información correspondiente de escritos, publicaciones científicas y prácticas comunes de diseños de mezclas asfálticas locales, como de organizaciones públicas y privadas, que contribuyen notablemente con criterios valiosos para proponer un entorno granulométrico y contenido de asfalto a nivel satisfactorio, de igual

forma permite identificar factores de comportamiento en los aspectos volumétricos en la mezcla, con los cuales se establece conclusiones cercanas a su desempeño.

Para realizar las pruebas y secuencia en la indagación agradezco al Sr. Ing. Diego Castillo, por facilitar las instalaciones de su laboratorio, como también por ser mi co-asesor y brindarme las directrices necesarias para el desarrollo de la tesis. Así mismo a Sr. Ing. Yandry Rivera y la Sra. Ing. Sandra Jerbes que me han ayudado con los materiales e instalaciones de la planta de asfalto del Municipio de Loja.



Tabla de contenido

Introducción	19
Capítulo 1 Información general	23
1.1. Introducción	23
1.2. Objetivos del estudio	24
1.2.1. <i>Objetivos generales</i>	24
1.2.2. <i>Objetivos específicos</i>	24
1.3. Alcances del estudio.....	24
1.4. Descripción general de la zona de estudio	25
1.5. Descripción de fuentes de materiales	26
1.6. Obtención de un diseño habitual de mezcla asfáltica en ciudad de Loja	28
1.6.1. Descripción de parámetros volumétricos de diseño para mezclas asfálticas elaboradas en la ciudad de Loja	30
Capítulo 2 Marco teórico	33
2.1. Pavimentos flexibles	33
2.2. Mezclas asfálticas en caliente	33
2.3. Método de diseño Marshall	34
2.3.1. <i>Agregados pétreos</i>	34
2.3.2. <i>Cemento asfáltico</i>	35
2.3.3. <i>Granulometría</i>	37
2.3.4. <i>Parámetros volumétricos</i>	40
2.3.5. <i>Prueba de mezcla asfáltica compactada por el método Marshall</i>	41
2.4. Método de diseño de mezclas asfálticas con metodología Superpave a Nivel I.....	41
2.4.1. <i>Pruebas de agregado mineral</i>	42
2.4.2. <i>Pruebas de ligante asfáltico</i>	44

2.4.3. Grado de desempeño del cemento asfáltico (PG).....	46
2.4.4. Límites de granulometría método Superpave a Nivel I.....	49
2.4.5. Parámetros volumétricos	53
2.5. Desempeño de mezclas asfálticas en caliente	54
2.5.1. Resistencia a la tracción indirecta (IDT).....	57
2.5.2. Módulo de rigidez.....	58
2.5.3. Fatiga	60
2.5.4. Deformación permanente o plástica	62
2.6. Susceptibilidad a la humedad	64
Capítulo 3 Metodología.....	67
3.1. Metodología para la innovación del diseño de mezclas asfálticas en caliente	67
3.2. Descripción de agregados.....	68
3.3. Caracterización de los materiales utilizados	70
3.3.1. Ensayo de granulometrías de los áridos	71
3.3.2. Peso específico de los agregados y Filler.....	72
3.3.3. Ensayo con azul de metileno	72
3.3.4. Ensayo de adherencia	74
3.3.5. Pruebas de consenso	75
3.3.6. Pruebas de origen	77
3.4. Pruebas habituales de clasificación para ligantes asfálticos.....	78
3.4.1. Viscosidad	79
3.4.2. Penetración	80
3.4.3. Punto de ablandamiento.....	80
3.4.4. Envejecimiento al horno (RTFOT).....	81
3.4.5. Ductilidad.....	81
3.5. Valores de clasificación por viscosidad	82
3.6. Ensayos de clasificación por desempeño según método Superpave	83
3.6.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV).....	83
3.6.2. Reómetro de corte directo (DRS).....	84
3.6.3. Reómetro de viga a flexión (BBR).....	85
3.7. Valores de las pruebas para la clasificación por desempeño del ligante en Ecuador....	86

3.8. Descripción del diseño de mezcla	88
3.8.1. Selección de granulometrías	89
3.8.2. Dosificación de las mezclas de agregados para preparación de las probetas	91
3.8.3. Elección del porcentaje de vacíos	95
3.9. Susceptibilidad a la humedad	95
3.10. Módulos de rigidez - Equipo NAT	96
Capítulo 4 Desempeño del diseño de mezcla asfáltica	97
4.1. Comportamiento del agregado mineral	97
4.2. Comparación granulométrica de los diseños	100
4.2.1. Granulometría de mezclas asfálticas elaboradas en el Municipio de Loja	100
4.2.2. Granulometrías propuestas para mezclas asfálticas por el sistema Superpave ..	102
4.3. Comportamiento volumétrico de la mezcla	104
4.3.1. Diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja	104
4.3.2. Diseños de mezclas asfálticas propuestos en la investigación	105
4.4. Comportamiento del módulo de rigidez (NAT)	112
4.4.1. Módulo de rigidez para diseños habituales producidos en la ciudad de Loja ...	112
4.4.2. Módulo de rigidez para diseños propuestos	115
4.5. Comparación granulometrías y módulos de rigidez para los diseños estudiados	119
4.6. Comportamiento de la sensibilidad a la humedad	122
Conclusiones	125
Recomendaciones	127
Lista de referencias	129
Apéndices	135
Apéndice A. Prueba del peso específico de arena lavada y agregado de 3/4"	136
Apéndice B. Prueba del peso específico de los minerales de 3/8" - 1/2"	137
Apéndice C. Ensayo de peso específico de los agregados 3/8" y 1/2" (Lavado)	138
Apéndice D. Ensayo de peso específico para el Filler	139
Apéndice E. Ensayo para obtener el porcentaje de partículas alargadas (3/4")	140
Apéndice F. Ensayo para obtener el porcentaje de partículas alargadas (1/2")	141
Apéndice G. Ensayo para obtener el porcentaje de caras fracturadas (3/4")	142
Apéndice H. Ensayo para obtener el porcentaje de deletéreos (1/2" y arena)	143

Apéndice I. Ensayo para obtener el porcentaje de deletéreos (3/4" y 3/8").....	144
Apéndice J. Ensayo para obtener el porcentaje de equivalente de arena (3/8" triturado)..	145
Apéndice K. Ensayo para obtener el porcentaje de equivalente de arena (Arena)	146
Apéndice L. Ensayo granulométrico para el agregado de 1/2"	147
Apéndice M. Ensayo granulométrico para el agregado de 3/4"	148
Apéndice N. Ensayo granulométrico para el agregado de 3/8" lavado	149
Apéndice O. Ensayo granulométrico para el agregado de arena lavada	150
Apéndice P. Ensayo granulométrico para el Filler.....	151
Apéndice Q. Ensayo de angularidad del agregado fino para arena sin lavar	152
Apéndice R. Ensayo de angularidad del agregado fino para arena lavada.....	153
Apéndice S. Ensayo de angularidad del agregado fino para material de 3/8" sin lavar.....	154
Apéndice T. Ensayo de angularidad del agregado fino para material de 3/8" lavado	155
Apéndice U. Ensayo de Adherencia del Agregado de 3/4"	156
Apéndice V. Ensayo de Abrasión	157
Apéndice W. Ensayo de azul de Metileno para el material 3/8" sin lavar	158
Apéndice X. Ensayo de Azul de Metileno para el material 3/8" lavado	159
Apéndice Y. Obtención de contenido de asfalto y granulometría de una mezcla en caliente elaborada en el Municipio de Loja para bacheo.....	160
Apéndice Z. Obtención de contenido de asfalto y granulometría de una mezcla en caliente elaborada en el Municipio de Loja para tendido en vía.	161
Apéndice AA. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño A	162
Apéndice BB. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño B.....	163
Apéndice CC. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño C.....	164
Apéndice DD. Ensayo para determinar el porcentaje de disgregación de los agregados por efectos del sulfato de sodio	165
Apéndice EE. Parámetros volumétricos de la mezcla elaborada en el Municipio de Loja (bacheo).....	166
Apéndice FF. Parámetros volumétricos de la mezcla elaborada en el Municipio de Loja (vía)	167

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del área urbana de la ciudad de Loja.	26
Figura 2. Ubicación mina Catamayito.	27
Figura 3. Ubicación mina Ramsés.	27
Figura 4. Ubicación mina Quinara.	28
Figura 5. Distribución granulométrica de un diseño habitual en la ciudad de Loja.....	29
Figura 6. Límites para granulometrías Superpave.	50
Figura 7. Diagrama de componentes de una HMA.....	53
Figura 8. Forma de impulso de carga, con periodo ascendente y carga máxima.....	56
Figura 9. Equipo NAT UN 10 Cooper.	57
Figura 10. Ruptura de un testigo en el ensayo de tensión indirecta.	58
Figura 11. Relaciones N_f vs ϵ correspondientes a promedios y percentiles.	61
Figura 12. Mecanismo de deformación permanente en la trayectoria de la rueda externa. ...	63
Figura 13. Esquema para la metodología de la investigación.	68
Figura 14. Muestra mineral grueso.	70
Figura 15. Muestra mineral fino.....	70
Figura 16. Lavado del agregado mineral.....	71
Figura 17. Ensayo de Granulometría.	72
Figura 18. Lavado del agregado mineral.....	73
Figura 19. Azul de metileno - material fino.	74
Figura 20. Adherencia asfalto- agregado.	74
Figura 21. Angularidad del agregado fino.	76
Figura 22. Equivalente de arena.....	76
Figura 23. Máquina de abrasión de Los Ángeles.....	77
Figura 24. Sulfato de Sodio.....	78

Figura 25. Cemento asfáltico.	79
Figura 26. Prueba en el Viscosímetro Brookfield a 60 °C.....	80
Figura 27. Ensayo punto de ablandamiento.	81
Figura 28. Cámara de envejecimiento de asfalto PAV.	84
Figura 29. Reómetro de corte directo.....	85
Figura 30. Reómetro de viga a flexión.....	86
Figura 31. Graduaciones para diseños propuestos A, B, C.....	90
Figura 32. Preparación de muestras.	91
Figura 33. Interacción ligante agregado.....	92
Figura 34. Temperatura después del envejecimiento al horno.....	92
Figura 35. Procedimiento de compactación con el martillo.....	93
Figura 36. Testigos para prueba equipo Marshall.....	93
Figura 37. Peso específico Bulk.....	94
Figura 38. Equipo Marshall.....	94
Figura 39 Testigos para equipo Marshall-NAT.....	95
Figura 40. Pruebas de briquetas equipo NAT.....	96
Figura 41. Curva granulométrica mezcla Municipio de Loja (bacheo).	101
Figura 42. Curva granulométrica mezcla Municipio de Loja (vía).....	101
Figura 43. Curva granulométrica para el diseño A.	103
Figura 44. Curva granulométrica para el diseño B.	103
Figura 45. Curva granulométrica para el diseño C.	104
Figura 46. Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño A.....	107
Figura 47. Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño B.....	109
Figura 48. Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño C.....	111
Figura 49. Prueba de módulo de rigidez para bacheo muestra # 1.	113
Figura 50. Prueba de módulo de rigidez para bacheo muestra # 2 113	113
Figura 51. Prueba de módulo de rigidez para tendido en vía muestra # 1.	114
Figura 52. Prueba de módulo de rigidez para tendido en vía muestra # 2.	114
Figura 53. Prueba de módulo de rigidez para el diseño A, probeta # 1.	115
Figura 54. Prueba de módulo de rigidez para el diseño A, probeta # 2.	116
Figura 55. Prueba de módulo de rigidez para el diseño B, probeta # 1.	117

Figura 56. Prueba de módulo de rigidez para el diseño B, probeta # 2.	117
Figura 57. Prueba de módulo de rigidez para el diseño C, probeta # 1.	118
Figura 58. Prueba de módulo de rigidez para el diseño C, probeta # 2.	118
Figura 59. Estructura granular de los diseños estudiados.	120

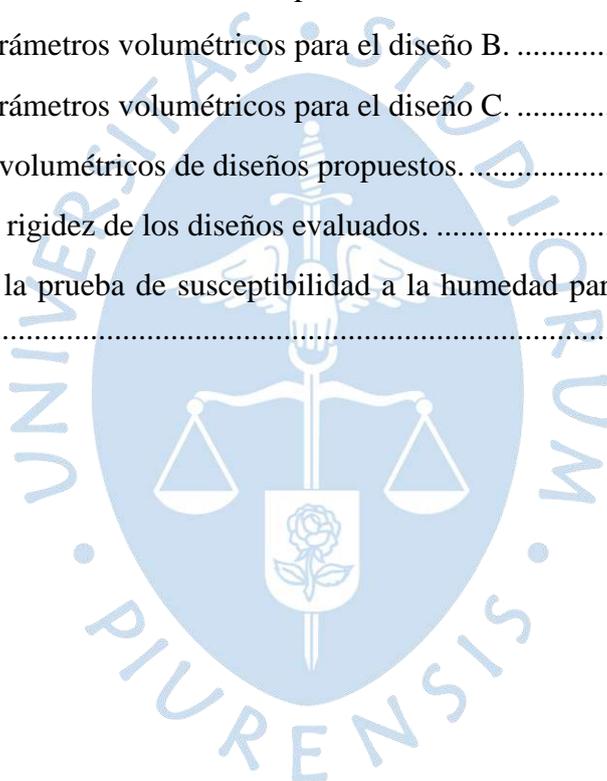




Lista de tablas

Tabla 1. Granulometría habitual en la ciudad de Loja.	29
Tabla 2. Parámetros volumétricos en diseños habituales para la ciudad de Loja.	31
Tabla 3. Calidad del agregado grueso, según especificaciones del MTOP para Ecuador.	35
Tabla 4. Calidad del agregado fino, según especificaciones del MTOP para Ecuador.....	35
Tabla 5. Especificación de cementos asfálticos del Ecuador para una clasificación por viscosidad a 60 °C.....	36
Tabla 6. Especificación de ligante asfáltico, según Reglamento Técnico Centroamericano para viscosidad a 60 °C.....	37
Tabla 7. Graduaciones de mezclas cerradas, según especificaciones del MTOP para-Ecuador.	38
Tabla 8. Porcentajes de graduación para las HMA.	39
Tabla 9. Vacíos del agregado mineral, según especificaciones del MTOP para-Ecuador.....	40
Tabla 10. Requisitos de ligantes, según especificaciones del MTOP para Ecuador.	40
Tabla 11. Requisitos de propiedades de consenso - método Superpave.	43
Tabla 12. Valores recomendados para propiedades de origen- método Superpave.....	43
Tabla 13. Ensayos de agregados para evaluar fallas en los pavimentos flexibles.....	44
Tabla 14. Designación de pruebas de cemento asfáltico - método Superpave.....	45
Tabla 15. Especificación 1. AASTHO para clasificación Superpave.	47
Tabla 16. Especificación 2. AASTHO para clasificación Superpave.	48
Tabla 17. Especificación de la gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal 19 mm. ..	52
Tabla 18. Especificación de la gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal 12,5 mm.	53
Tabla 19. Requisitos volumétricos del diseño de mezclas Superpave.	54
Tabla 20. Coordenadas de mina Ramsés.....	69
Tabla 21. Requisitos de azul de metileno, según especificación AASHTO.	73

Tabla 22. Resultados de clasificación por viscosidad del asfalto usado en la presente investigación.....	82
Tabla 23. Caracterización por grado de desempeño PG del ligante para Ecuador método Superpave.....	87
Tabla 24. Caracterización de los agregados.....	98
Tabla 25 Granulometrías diseños en la ciudad de Loja.....	100
Tabla 26. Granulometrías utilizadas para nuevos diseños de mezcla.....	102
Tabla 27. Parámetros volumétricos de diseños elaborados en la plata de asfalto del Municipio de Loja.....	104
Tabla 28. Datos de parámetros volumétricos para el diseño A.....	106
Tabla 29. Datos de parámetros volumétricos para el diseño B.....	108
Tabla 30. Datos de parámetros volumétricos para el diseño C.....	110
Tabla 31. Parámetros volumétricos de diseños propuestos.....	112
Tabla 32. Módulos de rigidez de los diseños evaluados.....	119
Tabla 33. Valores de la prueba de susceptibilidad a la humedad para mezclas del diseño C.....	123



Introducción

En la actualidad para la elaboración del diseño de pavimento flexibles se acudido a varios procedimientos como: Marshall, Hveem, RAMCODES. El más utilizado con mayor difusión y aceptación para diferentes países de la región, como también para la normativa ecuatoriana es la metodología Marshall. Sin embargo, numerosas publicaciones científicas han demostrado que debido a su naturaleza empírica es altamente discutido, ya que este procedimiento fue propuesto en función del movimiento de cargas en diferentes condiciones a las actuales y no considera el desempeño del pavimento bituminoso en un periodo considerable en el tiempo, ni las consecuencias que pueda tener referente al comportamiento de la estructura flexible como lo hace el sistema Superpave.

Considerando los aspectos anteriores, el programa para la investigación en carreteras SHRP (Strategic Highway Research Program) propone un nuevo procedimiento de dosificación de mezclas asfálticas llamado Superpave (Superior Performance Pavement). El cual desarrolla exigencias del cementante, dispositivo de compactación, parámetros relacionados con los agregados y por último establece una estructura granular en la que poseen puntos de control, zona de restricción y tamaño máximo nominal, como medida de comportamiento del pavimento utiliza la implementación de nuevos ensayos: el equipo de corte de Superpave (SST) y el equipo de tracción indirecta (IDT), que sirven para predecir el desempeño de la mezcla.

La intención fundamental de la presente investigación consiste en ajustar los materiales utilizados a especificaciones de control para pruebas de consenso y origen del sistema Superpave. Elaborar algunas estructuras flexibles con esqueletos granulares diferentes, con la finalidad de hacer variar el esqueleto granulométrico de tres formas distintas: primeramente, que la gráfica se encuentre bajo la zona restringida, luego; entre la línea máxima densidad y la línea inferior de la zona de restricción y por último que la gráfica cruce la dicha zona por la parte superior de línea de máxima densidad, y para todos los escenarios la curva terminar cerca de los puntos de control superior. Con dichas distribuciones granulares se permiten evaluar el comportamiento de la mezcla respecto a parámetros volumétricos, como también el nivel de desempeño que poseen bajo módulos de rigidez obtenidos del equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT).

Para adentrarnos en el desempeño de mezclas asfálticas, diversos estudios han considerado al módulo de rigidez como un parámetro para evaluar el comportamiento de los pavimentos flexibles, entre esos está principalmente, el Comité Europeo de Normalización

CEN EN 13108-1 (2008), el cual detalla que como requerimientos generales para elaborar mezclas asfálticas se basa en dos criterios: primero el empírico, donde se fundamenta el control volumétrico del ensayo de susceptibilidad a la humedad y la prueba de pista, y segundo referente a pruebas de comportamiento para controlar la rigidez, como la resistencia al ahuellamiento con el ensayo a compresión cíclica triaxial y la resistencia a la fatiga sobre vigas trapezoidales o prismáticas. Todos estos ensayos se los realiza con el equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) y con la obtención del módulo resiliente se provee valores sobre las características de la mezcla, a pesar de que la rigidez no es una medida de resistencia; cabe mencionar que un alto valor de rigidez significa que bajo esfuerzos aplicados existirá una baja deformación de la mezcla (Vila y García, 2015).

Tomando en consideración todas las componentes antes indicadas para valorar el desempeño del firme flexible, se propone un esqueleto granula a nivel satisfactorio con una graduación que atraviesa la zona restringida y termina por la parte superior de la línea máxima de densidad cerca de los puntos de control superior de la graduación del sistema Superpave. Para el desarrollo y comprobación de este experimento se recurre a elaborar cinco capítulos que se describen de la siguiente manera.

El capítulo uno describe los objetivos generales y específicos de la investigación, la ubicación de las diferentes minas que proveen de materiales para el diseño de mezclas asfálticas en la planta de asfalto del Municipio de Loja, y la descripción de los aspectos volumétricos utilizados para el diseño del pavimento flexible elaborada en la localidad.

En el capítulo dos, se especifica las técnicas a emplearse para el diseño de una mezcla de asfalto en caliente (HMA), para inicial se encuentra la tecnología Marshall que es típicamente usada en Ecuador y en la cual se describe la importancia de cada uno de sus parámetros volumétricos y su comportamiento respecto cohesión – fricción; y, por último el método Superpave que es el más reciente para diseño de pavimentos flexibles, donde considera sustancialmente la conformación del entorno granulométrico basado en los sitios de control y área restringida, como también un análisis minucioso del lígate asfáltico; para ambas metodologías se emplean ensayos volumétricos y mecánicos. Así mismo se describe la implementación de modelos de desempeño para mezclas asfálticas con el equipo NAT.

El capítulo tres, describe el experimento realizado en la presente tesis, donde primeramente se aplica a los materiales las pruebas de calidad (agregado mineral - asfalto) para cada uno de los ensayos tanto del sistema Marshall como Superpave y el agregado mineral que no esté dentro de las especificaciones locales o de las metodologías antes indicadas, se realiza la corrección hasta que cumplan las normativas. Segundo, determinar el esqueleto granular para cada uno de los diseños propuestos tomado en cuenta todas las consideraciones en relación al entorno granulométrico y contenidos de asfalto. Por último, se hace una descripción del procedimiento por compactación dinámica de la tecnología Marshall utilizada para la elaboración de los nuevos diseños y como resultado del proceso se presentan tablas y gráficas de los parámetros volumétricos de cada escenario.

En el capítulo cuatro, se exhiben resultados de estructuras granulares, parámetros volumétricos y módulos de rigidez, tanto para diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja, como para los diseños propuestos. Así mismo se hace una comparación y evaluación de todos los diseños, con la finalidad de promover una granulometría y contenido de asfalto óptimo que ofrezca un nivel de comportamiento tolerable o satisfactorio bajo los módulos de rigidez.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.





Capítulo 1

Información general

1.1. Introducción

El rápido agrietamiento que sufre el pavimento flexible en la ciudad de Loja es producido por el aumento de cargas de tránsito, principalmente por peso en cada eje y frecuencia de tránsito. Así mismo existen otros factores como: la aplicación de materiales inadecuados, diferentes técnicas de construcción, oxidación del ligante asfáltico bajo efectos de mezclado transporte y compactación de la mezcla, susceptibilidad térmica y la incidencia del agua que es constante en este sector, que inciden el desprendimiento de los agregados ocasionando deformaciones permanentes antes de su vida útil.

Kiggundu y Roberts (1988, como se citó en Gualpa, 2017, p. 7) definen el daño por presencia de agua en una mezcla asfáltica como el deterioro de la capacidad estructural de la mezcla al interior de su microestructura debido a la pérdida de rigidez, disminución de cohesión y adhesión.

Por esta razón ante las múltiples variables que afecta a la calidad de los pavimentos flexibles en la ciudad de Loja, es necesario contar con áridos 100% triturados, considerar un porcentaje mínimo de filler de aporte. Así mismo establecer la composición del ligante asfáltico, el cual permite conocer la resistencia al envejecimiento, grado PG, valor a temperatura intermedia y valor Jnr (flujo y recuperación a diferentes esfuerzos) que son obtenidos de las características reológicas del sistema Superpave.

La irrupción del método Superpave no influye solamente en las características del asfalto, sino también en disponer de una estructura granular definida, así mismo evaluar los aspectos de las HMA que se fusionan densamente al ser compactadas con el uso del compactador giratorio. Todas estas componentes anteriormente señaladas no son realizadas por la tecnología Marshall, el mismo que se ve obligado a redefinir su aplicación principalmente a los riesgos de colapso de las mezclas asfálticas en sus tres criterios de fallas: deformación plástica, la fisuración por fatiga y la fisuración térmica. Cabe mencionar que para ambas metodologías se evalúa el comportamiento de los

parámetros volumétricos que son: vacíos de aire (Va), vacíos del agregado mineral (VAM), vacíos llenos de ligante (RBV) y el porcentaje de ligante (Pbe)” (Chimborazo, 2012, p.27).

Por otra parte, se cita también el módulo de rigidez, el cual hace mención al nivel de desempeño que posee las HMA y que su valor se adquiere del equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) (Gabriel et al., 2015, p. 50). Dicho valor nos permite aseverar que las propiedades volumétricas obtenidas del método Marshall son idóneas para proponer un diseño de mezcla a nivel tolerable o satisfactorio.

El fin de esta tesis es proporcionar un diseño de pavimento flexible que cumpla exigencias de mezcla a nivel tolerable o satisfactoria, determinado por su valor de rigidez, que se obtiene del equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT). Para lo cual se utiliza variaciones del entorno granulométrico del sistema Superpave y con estas estructuras granulares se realizan los diseños de mezcla asfáltica hasta obtener todos los parámetros volumétricos y elegir el diseño ideal en función de su comportamiento.

1.2. Objetivos del estudio

1.2.1. Objetivos generales

- Elaborar un diseño de mezcla asfáltica en caliente a nivel satisfactorio bajo el control del módulo de rigidez con la implementación de la tecnología Superpave a nivel I para mejorar el desempeño de obras de pavimentación en la ciudad de Loja.

1.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las cantidades idóneas de material pétreo para formar la estructura granular de un diseño de mezcla asfáltica en caliente que cumpla especificaciones tanto para la tecnología Marshall y Superpave a nivel I.
- Cumplir con un porcentaje de vacíos en la mezcla de 4 como mínimo.
- Proponer un esqueleto granular que permita cumplir un nivel de exigencia tolerable o satisfactorio.
- Definir un rango de contenido de asfalto que ofrezca un comportamiento adecuado respecto a módulos de rigidez.
- Obtener un diseño de mezcla asfáltica en caliente con un módulo de rigidez entre 2500 a 3000 MPa para un nivel tolerable y valores entre 3000 a 4000 MPa para un nivel satisfactorio
- Analizar resultados de parámetros volumétricos y módulo de rigidez de todos los diseños para establecer límites granulométricos que eviten mezclas inadecuadas.

1.3. Alcances del estudio

- La investigación permite identificar si el agregado mineral utilizado en diseños locales cumple con las exigencias técnicas recomendadas por el sistema Marshall y Superpave a Nivel I y de existir problemas de control de calidad proponer su corrección.

- Todo lo que pertenece al diseño del firme flexible, elaboración de briquetas y demás pruebas se realizan en Estsuelcon Cía. Ltda. laboratorio de ensayos de materiales para el control de calidad.
- Con la fabricación de las briquetas se logra determinar los ensayos de comportamiento de las HMA con la metodología Marshall.
- Se determina el módulo de Rigidez con el equipo de Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT), para evaluar el comportamiento del firme flexible ya sea inadecuado, tolerable o satisfactorio.
- Se cumplen requerimientos de estructura granular del sistema Superpave a nivel I.
- La presente tesis permite establecer una estructura granular y parámetros volumétricos adecuados al evaluar la información obtenida de los ensayos de las dos metodologías (Marshall y Superpave a nivel I) y del módulo de rigidez.
- Con la información obtenida, permite determinar la mejor alternativa de diseño a utilizar en la ciudad de Loja.

1.4. Descripción general de la zona de estudio

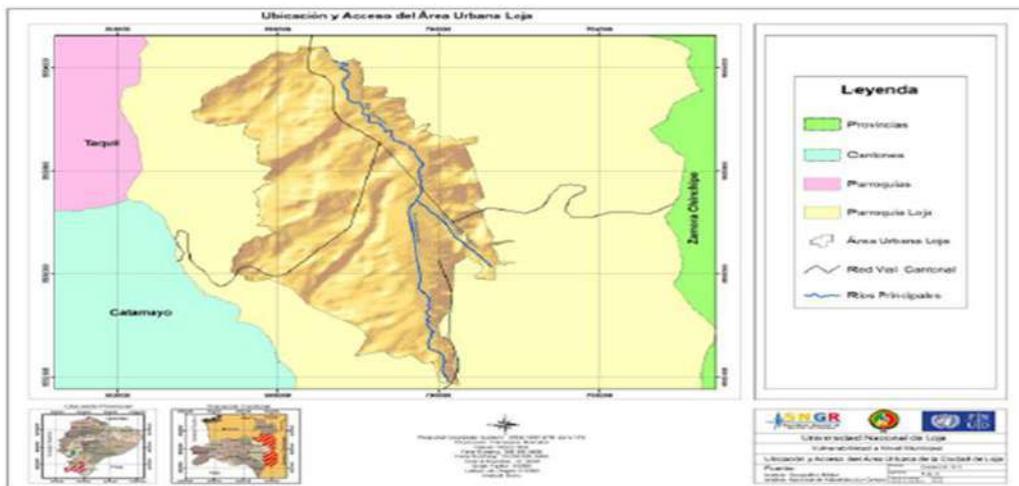
El lugar seleccionado para el desarrollo de esta tesis es el cantón Loja, provincia de Loja. Geográficamente se encuentra ubicado en la región sur del Ecuador, con una extensión de 1.895,53 Km², distribuida en 13 parroquias rurales y 4 urbanas. La ubicación geodésica está entre 9501249 y 9594638 de latitud Sur, y 661421 y 711075 de longitud Oeste (Paladines, 2013, p. 11), como se indica en la Figura 1.

La altitud del cantón oscila entre 2100 y 2160 msnm, posee un clima frío con temperatura promedio que oscila entre 16 y 21 °C (Paladines, 2013, p. 11), como también la presencia continua de precipitación en la ciudad, datos obtenidos de la estación meteorológica La Argelia que pertenece al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INHAMI). La topografía que se presenta en la zona es bastante irregular con pendientes alrededor de 9%, pues se encuentra en el valle interandino, entre la cordillera central y occidental de los Andes.

Se eligió este sector para el estudio, debido a que el Municipio de la ciudad de Loja dispone de una planta de asfalto para la preparación de mezclas asfálticas, como también por la accesibilidad en la adquisición de agregados pétreos y equipos para efectuar ensayos de laboratorio en sitio.

Figura 1

Ubicación del área urbana de la ciudad de Loja.

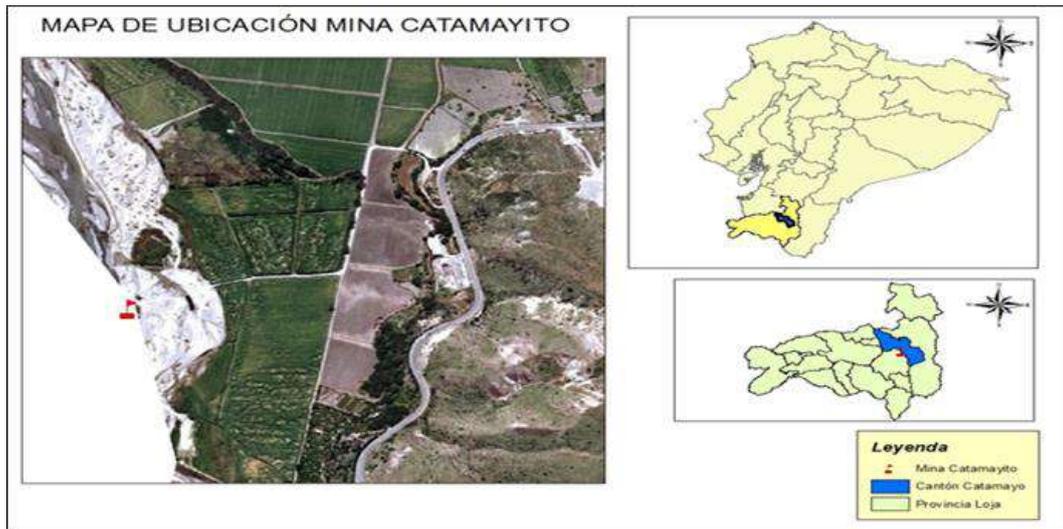


Fuente: Paladines (2013). Vulnerabilidad a nivel Municipal del Cantón Loja.

1.5. Descripción de fuentes de materiales

En lo que respecta a la provisión de agregados pétreos para la fabricación de pavimentos flexibles producidas en la planta de asfalto del Municipio de Loja, existen tres sectores concesionados, que se detallan a continuación:

- Mina “Catamayito” ubicada en el cantón Catamayo provincia de Loja con coordenadas: 678897.00Este; 9554222,00Norte (Figura 2).
- Mina “Ramsés” del cantón Zamora con Coordenadas: 734900,00 Este; 9555700,00Norte (Figura 3).
- Mina “Quinara” que pertenece al cantón Loja con Coordenadas: 4.334459, 00Este; 79.226268,00 Norte (Figura 4).

Figura 2*Ubicación mina Catamayito.*

Fuente: Gualpa (2017). Evaluación de la influencia del espesor de una carpeta asfáltica porosa, en la infiltración del agua superficial de una vía.

Figura 3*Ubicación mina Ramsés.*

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4*Ubicación mina Quinara.*

Fuente: Elaboración propia.

1.6. Obtención de un diseño habitual de mezcla asfáltica en ciudad de Loja

En los expedientes técnicos analizados, el procedimiento que utiliza la normativa ecuatoriana para preparar un diseño de una HMA se realiza aplicando la tecnología Marshall. Este método es un ensayo de laboratorio donde básicamente se desarrolla por la elaboración de especímenes de prueba y para preparar las briquetas, se calientan y mezclan los pétreos con el ligante hasta obtener una temperatura óptima de compactación para finalmente someten la muestra al equipo Marshall a pruebas de Estabilidad y Flujo.

Dentro de los aspectos principales estandarizados en el diseño habitual de mezcla asfáltica en la localidad, está el valor de 4% que es el porcentaje de vacíos (V_a) asignado para determinar el contenido óptimo de asfalto, porcentaje de vacíos llenos de asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos en el agregado mineral (VMA), destacando la importancia de estas componentes volumétricas para la evaluación de la mezcla por el método Marshall (Garnica et al., 2004a).

En lo que respecta a propiedades del ligante asfáltico utilizado para la composición asfalto-agregado, el producto es producido en la refinería de petróleo en Esmeraldas – Ecuador, clasifica como tipo AC-20. Adicional a esto no existe información sobre caracterización de cemento asfáltico en lo que refiere a la tecnología Superpave a nivel I, el mismo que evalúa detalladamente el cementante.

Otra componente analizada de todos los expedientes técnicos de diseño de una HMA en la ciudad de Loja, es la estructura granular, que toma como exigencia la faja de graduación con tamaño máximo del agregado 1/2" (12,50 mm), este esqueleto granular es tomado de la norma ASTM D3515 que al compararlo con la granulometría de diseños habituales producidos en la planta de asfalto del Municipio de Loja cumple, como se puede ver en los límites de la exigencia de la Tabla 1. Pues estos diseños tienden a utilizar un porcentaje elevado en fracciones finas de

agregado y hay que tener un control estricto con respecto a las especificaciones de pruebas para consenso y de origen, puesto que en los expedientes técnicos revisados no existe el ensayo de angularidad del agregado fino (ASTM C 1252) que constituye un valor significativo para un buen empaquetamiento entre las partículas de las mezclas con graduación fina.

Tabla 1

Granulometría habitual en la ciudad de Loja.

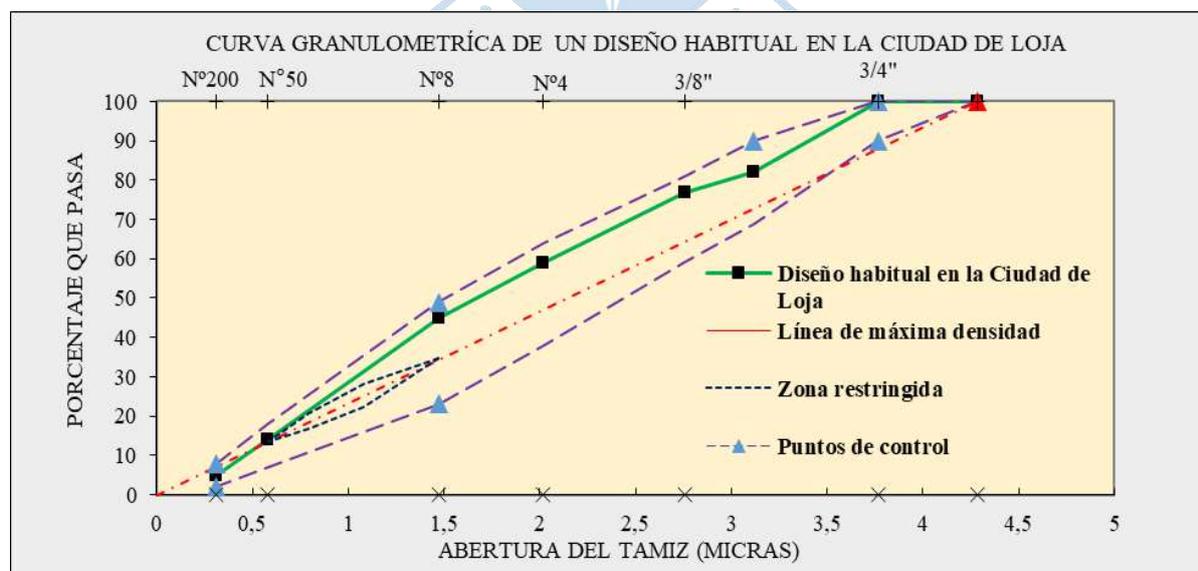
TAMIZ N°	ASTM D 3515 (FAJA 1/2")		GRANULOMETRÍA HABITUAL LOJA
	MÍNIMO	MÁXIMO	
1"	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00
1/2"	90,00	100,00	82,00
N°4	44,00	74,00	59,00
N°8	28,00	58,00	45,00
N°50	5,00	21,00	14,00
N°200	2,00	10,00	5,00

Fuente: Gálvez (2018). Expedientes Técnicos de la Ciudad de Loja.

También se efectúa una comparación granulométrica de un diseño habitual en Loja con el método Superpave a nivel I, el cual demuestra que la estructura granular se ubica sobre la zona restringida y la línea de máxima densidad, así mismo la curva tiende a unirse con el límite superior de la faja granulométrica para mezclas cerradas de la norma ASTM D3515 con tamaño nominal de 12,5 mm, como se observar en la Figura 5.

Figura 5

Distribución granulométrica de un diseño habitual en la ciudad de Loja.



Fuente: Gálvez (2018). Elaboración propia a partir de "Expedientes Técnicos de la Ciudad de Loja".

1.6.1. Descripción de parámetros volumétricos de diseño para mezclas asfálticas elaboradas en la ciudad de Loja

En los expedientes examinados se observa que las granulometrías diseñadas para diferentes mezclas asfálticas son definidas por una graduación densa fina con tamaños menores a ½ pulgada, donde existe un alto porcentaje de serie fina en todos los diseños revisados, igual cumple con el esqueleto granular dispuesto por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (MOP-001-F, 2002). Ver tabla 2.

Refiriéndose a los aspectos volumétricos ampliamente usados y que forman parte de los requisitos de diseño de mezclas para el método Marshall, está el contenido óptimo de asfalto que fluctúa entre 6.00-6.30% comportándose adecuadamente con la relación filler / betún, y que se ubica dentro del rango establecido de 0.80 a 1.20 (MOP-001-F, 2002).

Dentro de las componentes volumétricas que se comporta inadecuadamente es la relación Betún – Vacíos (R. B. V.), pues presenta valores entre 75-82%, excediendo la normativa del Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador (NEVI-12-MTOP, 2013), como se deja ver en los datos de la tabla 2. En lo que respecta a la densidad aparente BULK presenta valores que oscila entre 2230-2400 gr/cm³ y la densidad teórica RICE fluctúa entre 2340-2430 gr/cm³.

Por último, los resultados de evaluación de este tipo de pavimentos flexibles, indican que el parámetro de estabilidad que se encuentra en un rango de 1860 lb a 2 300 lb, y valores referentes al flujo están entre 10-12 mm. Todos los aspectos volumétricos cumplen la normativa referente al procedimiento de la tecnología Marshall, pero no existen otros elementos que nos permitan hacer una comparación con el comportamiento de las HMA tanto con el ligante asfáltico como la granulometría del sistema Superpave (Estado Unidos). Así mismo no existe una valoración para el nivel de desempeño ya sea: inadecuado, tolerable o satisfactorio, que se determina con el valor de módulo de rigidez (Europa) obtenido del equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) para mezclas recién elaboradas en planta.

Tabla 2*Parámetros volumétricos en diseños habituales para la ciudad de Loja.*

N.º	Parámetros volumétricos	Unidades	Rango		Especificación (MTOPEcuador)	
			Inferior	Superior		
1	Densidad. Aparente BULK.	gr/cm ³	2.230	2.400	-	
2	Densidad. Teórica RICE.	gr/cm ³	2.340	2.430	-	
3	Índice vacío.	%	4	4	3	5
4	Contenido óptimo de asfalto	%	6.00	6.30		
5	V.A.M.	%	17	18	> 14	
6	R.B.V.	%	75	82	65	75
7	Estabilidad.	lb	1860	2300	> 1800	
8	Fluencia.	mm	10	12	8	14
9	Relación Filler/Betún	-	0.60	1.30	0.80	1.20

Fuente: Gálvez (2018). Elaboración propia a partir de “*Expedientes Técnicos de la Ciudad de Loja*”.





Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Pavimentos flexibles

La influencia que suscita por el transporte, comercio e incremento exagerado del parque automotor, así mismo la migración de personas del sector rural hacia las ciudades involucra un incremento en la construcción de redes viales, de ahí surge la necesidad de ofrecer buenos servicios de movilidad interna y accesibilidad eficiente a derechos de salud, empleo, educación, seguridad, alimentación, entre otros. Para mejorar la vialidad, se promueve la necesidad de ampliar o mejorar las estructuras de pavimentos de tal forma que al elaborar estos paquetes estructurales deben poseer la resistencia necesaria y suficiente para sobrellevar las sollicitaciones de cargas que son provocadas por el tráfico, y a su vez ofrecer confort y durabilidad para el tiempo que fueron diseñados.

Los pavimentos más comunes utilizados en nuestro entorno son pavimentos flexibles que se caracterizan por la importancia de lograr propiedades volumétricas adecuadas en la carpeta asfáltica, de esto depende considerablemente el comportamiento de la superficie de rodamiento en su vida de servicio (Garnica et al., 2005b). La metodología para elaborar un diseño de mezcla asfáltica se basa directamente en procedimientos empíricos de laboratorio, llegando así a consensuar con todos estos criterios una correlación de desempeño del pavimento.

2.2. Mezclas asfálticas en caliente

Dentro de los pavimentos flexibles, están las mezclas asfálticas en caliente que son las de nuestro interés, debido a que es una de las alternativas de mayor utilización en el mercado vial ecuatoriano. Básicamente están compuestas por áridos, filler, cemento asfáltico y aditivos. El cemento asfáltico proporciona condiciones de elasticidad y consistencia, también existen otras propiedades que lo hace durable y estable al pavimento. “En las mezclas asfálticas en caliente se debe equilibrar propiedades como: estabilidad, durabilidad, resistencia a la fatiga, permeabilidad, resistencia al deslizamiento entre otras” (Gualpa, 2017, p. 6).

Al involucrar más componentes de control para el pavimento, surge la necesidad de innovar e implementar al diseño de mezclas asfálticas en caliente nuevos métodos o tecnologías, con la finalidad de evitar la degradación prematura de las estructuras flexibles debido a fallas por fatiga

o deformaciones permanentes que comúnmente se presenta en el pavimento asfáltico. El deterioro por fatiga se presenta cuando existen valores altos de deformación a tracción en la zona interior de la capa asfáltica, de ahí que los ensayos de caracterización de agregados deben poseer un valor real en el comportamiento a la rigidez. En cambio, la deformación permanente es la resistencia que pueden experimentar los materiales bajo efectos de cargas cíclicas a distintas condiciones de ambiente (Segovia, 2014). Otros factores que se debe tener en cuenta a la hora de mejorar el diseño de estructuras flexibles es la densidad de materiales, contenido de finos, graduación, naturaleza del agregado pétreo, número de frecuencia de carga y procesos constructivos (García et al., 2017). Por ende, la variabilidad de información con la cual se debe contar es necesaria para disponer de todos elementos que se acerquen al comportamiento de cada uno de los materiales que componen el pavimento flexible. Para esto se utiliza el método Marshall y Superpave y modelos de desempeño como el valor del módulo de rigidez (Vila y García, 2015).

2.3. Método de diseño Marshall

Este método se basa en una investigación extensa realizada por el Departamento de Autopistas del Estado de Mississippi del Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, formulado por el ingeniero Bruce Marshall, el mismo que mejoró múltiples aspectos al procedimiento de prueba Marshall y que estableció algunos criterios de diseño de mezclas asfálticas (Garnica, Delgado, et al., 2005)

Inicialmente el método se diseñó con agregados de tamaño máximo de 25 mm (1") o menor, posteriormente el diseño fue modificado con tamaño máximo superior a 38 mm (1,5"), y ahora se está aplicando para diseño de mezclas asfálticas en caliente con graduación densa a pesar de que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica (Garnica, Delgado, et al., 2005)

Para la elaboración del diseño Marshall, se utilizan especímenes de prueba estándar de 64 mm (2½") de alto y 102 mm (4") de diámetro, para esto se inicia calentando el cemento asfáltico conjuntamente con los agregados (ASTM D 1559), luego se realiza la preparación de los testigos con la compactación dinámica que ejerce el martillo de impacto y por último para su evaluación, se comprueba con los aspectos volumétricos como: análisis de vacíos, volumen de agregado mineral, relación de betún asfalto, prueba de estabilidad y flujo de las probetas compactadas (Garnica et al., 2005b, p. 14)

2.3.1. Agregados pétreos

El método Marshall solo establece requisitos referentes a estructura granular y parámetros volumétricos de la mezcla, pero para las exigencias que deben cumplir los agregados pétreos, los determina la dependencia encargada de establecer estos requisitos de control como es el Ministerio de Transporte y Obras públicas del Ecuador, institución que regula y controla cada uno de los procedimientos y parámetros que deben cumplir los diseños de mezclas asfálticas en caliente y que se encuentran publicadas en la normativa ecuatoriana:

MOP-001-F, 2002 y NEVI-12-MTOP, 2013. A continuación, se describe en la Tabla 3 y 4 los requerimientos de agregados pétreos (MTOP) para mezclas asfálticas.

Tabla 3

Calidad del agregado grueso, según especificaciones del MTOP para Ecuador.

Característica		Valor (%)
Durabilidad (Sulfato de sodio)		Máx. 10
Angularidad	1 cara	Mín. 85
de agregado Grueso	2 caras	Mín. 80
Partículas alargadas y achatadas		Máx. 10
Desgaste de los Ángeles		Máx. 35
Recubrimiento y peladura de mezclas bituminosas		Mín. 95
Deletéreos		Máx. 1

Fuente: NEVI-12-MTOP (2013). Especificaciones Técnicas del Ecuador.

Tabla 4

Calidad del agregado fino, según especificaciones del MTOP para Ecuador.

Característica	Unidades	Valor
Equivalente de Arena	%	Mín. 50
Azul de metileno	mg/g	Máx. 12
Angularidad del agregado fino	%	Mín. 40
Deletéreos	%	Máx. 1

Fuente: NEVI-12-MTOP (2013). Especificaciones Técnicas del Ecuador.

2.3.2. Cemento asfáltico

Es un material bituminoso de color negro, composición muy compleja y de naturaleza hidrocarbonada, posee propiedades adhesivas y aglomerantes, además dispone de un comportamiento reológico, en el que están basadas sus aplicaciones tecnológicas principalmente en las mezclas asfálticas. En cuanto a su composición química, está formado por los asfáltenos que son los responsables de parámetros como la resistencia, en cambio la rigidez y la estructura coloidal del asfalto proporcionan adherencia, plasticidad y ductilidad. Por último, los saturados y aromáticos que son responsables de la viscosidad y la fluidez del ligante (León y Villao, 2017).

Las propiedades ideales que debe poseer un ligante asfáltico para un buen comportamiento son tener alta elasticidad a elevadas temperaturas, suficiente ductilidad a bajas temperaturas, la susceptibilidad debe ser baja respecto al cambio de temperatura, buena adhesión y cohesión, bajo contenido de parafina y por último excelente resistencia al envejecimiento.

El asfalto elaborado en el Ecuador, es producido por la refinería de petróleo ubicada en ciudad de Esmeraldas y para su clasificación utiliza el principio fundamental de viscosidad absoluta a 60 °C, de acuerdo a este resultado se establece el grado de AC correspondiente, verificando que los requisitos se encuentren en la normativa (INEN 2515, 2010). Así mismo existe otra especificación de cementos asfálticos según Reglamento Técnico Centroamericano (RTC) para una clasificación por viscosidad a 60 °C, ver en las Tablas 5 y 6 respectivamente.

Tabla 5

Especificación de cementos asfálticos del Ecuador para una clasificación por viscosidad a 60 °C.

Ensayo	Unidad	Grado de Viscosidad										Norma de ensayo
		AC-6		AC-10		AC-20		AC-30		AC-42		
		Mín.	Max	Mín.	Max	Mín.	Max	Mín.	Max	Mín.	Max	
Viscosidad absoluta; 60 °C	Pa s	50 ± 20		100 ± 20		200 ± 40		300 ± 60		420 ± 60		ASTMD 2171
Viscosidad cinemática, 135 °C	mm ² s ⁻¹	175	--	250	--	300	--	350	--	400	--	ASTMD 2170
Punto de Inflamación	°C	177	--	219	--	232	--	232	--	232	--	NTE INEN 808
w, Solubilidad en tricloroetileno ^c	%	99	--	99	--	99	--	99	--	99	--	NTE INEN 915
Gravedad específica °C/25 °C	25	Informe		Informe		Informe		Informe		Informe		ASTMD 70
índice de Penetración ^B		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		-1,5 a +1		ASTM D5/D5M
Residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio:												
Viscosidad, 60 °C	Pa s	--	300	--	500	--	800	--	1200	--	2000	ASTMD 2171
Cambio de masa,	% w/w	--	1.50	--	1.00	--	1.00	--	1.00	--	1.00	ASTMD 2872
Ductilidad ^A , 25 °C [77 °F], 5 cm/min	cm	100	--	75	--	50	--	40	--	25	--	NTE INEN 916
^A Si la ductilidad es menor a 100, el material debe ser aceptado, solo si la ductilidad a 15,5 °C es mínimo 100 a una velocidad de tiro de 5 cm/min.												
^B Índice de penetración = $\frac{1952 - 500 \log pen - 20SP}{50 \log pen - SP - 120}$ donde: pen = penetración a 25 °C, 100 g, 5 s SP = punto de ablandamiento (°C) ASTM D36												
^c Solubilidad en bromuro de propilo N puede ser un método alternativo a la solubilidad en TCE.												

Fuente: INEN 2515/Enmienda 1 (2014). Instituto Ecuatoriano de Normalización

Tabla 6

Especificación de ligante asfáltico, según Reglamento Técnico Centroamericano para viscosidad a 60 °C.

CARACTERÍSTICAS	UNIDAD	MÉTODO ASTM	Grado de viscosidad					
			AC-25	AC-5	AC-10	AC-20	AC-30	AC-40
Viscosidad, 60 °C	N s/m ²	D-2170	250 ± 50	500 ± 100	1000 ± 200	2000 ± 400	3000 ± 600	4000 ± 800
Viscosidad 135 °C mínimo	mm ² /s	D-2170	125	175	250	300	350	400
Penetración 25°C, 100 g, 5s, mínimo	1/10mm	D-5	220	140	80	60	50	40
Punto de Inflamación Cleveland Copa Abierta mínimo	°C	D-92	163	177	219	232	232	232
Solubilidad en tricloroetileno, mínimo	%	D-2042	99	99	99	99	99	99
Viscosidad, 60 °C, max	N s/m ²	D-2171	1250	2500	5000	10000	15000	20000
Ductilidad, 25°C, 5cm/min, mínimo	cm	D-113	100	100	75	50	40	25

Fuente: Delgado (2011). Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047).

2.3.3. Granulometría

La tecnología Marshall utiliza una gráfica semilogarítmica para definir la granulometría permitida, en donde la ordenada se encuentra el porcentaje del material que pasa por cierta malla, y en la abscisa las aberturas de las mallas en mm. Para la selección de la curva granulométrica se basa en dos componentes principales, el tamaño máximo nominal del agregado y el esqueleto granular (superior e inferior), las líneas de control significan que son los puntos obligados por donde debe pasar la graduación (Garnica et al., 2004a).

En la Tabla 7, se indican los tamaños máximo nominales del agregado más utilizados, así como también los rangos de control según la norma ecuatoriana (NEVI-12-MTOP, 2013) y que son similares a la especificación (ASTM D3515, 2010).

Tabla 7*Graduaciones de mezclas cerradas, según especificaciones del MTOP para-Ecuador.*

Mezclas Cerradas									
Tamaño máximo nominal del agregado									
Nº TAMIZ	2 in	1½ in	1 in	¾ in	½ in	⅜ in	Nº4	Nº8	Nº16
	50 mm	37,50 mm	25,00 mm	19,00 mm	12.50 mm	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	1.18 mm
Graduación para mezclas de agregado grueso, fino y filler									
2 ½ in (63 mm)	100.00								
2 in (50 mm)	90 - 100	100.00							
1½ in (37,5 mm)		90-100	100.00						
1in (25 mm)	60 - 80		90-100	100.00					
¾ in (19 mm)		56 -80		90-100	100.00				
½ in (12,5 mm)	35 - 65		56 -80		90-100	100.00			
3/8 in (9,50 mm)				56 -80		90-100	100.00		
Nº4 (4,75 mm)	17 - 47	23 - 53	29 - 59	35 - 65	44 - 74	55 - 85	80 - 100		100.00
Nº8 (2,36 mm)	10 - 38	15 - 41	19 - 45	23 - 49	28 - 58	32 - 67	65 - 100		95 - 100
Nº16 (1,18 mm)							40 - 80		85 - 100
Nº30 (1,18 mm)							35 - 65		70 - 95
Nº50 (600 um)	03 - 15	04 - 15	05 - 17	05 - 19	05 - 21	07 - 23	07 - 40		45 - 75
Nº100 (150 um)							03 - 20		20 - 40
Nº200 (75 um)	0 - 5	0 - 6	01 - 07	02 - 08	02 - 10	02 - 10	02 - 10		09 - 20
Asfalto, Porcentaje con respecto al peso total de la muestra									
	2 - 7	3 - 8	3 - 9	4 - 10	4 - 11	6 - 12	6 - 12	7 - 12	7 - 12

Fuente: MOP-001-F (2002) y NEVI-12-MTOP (2013). Especificaciones Técnicas del Ecuador.

El esqueleto granular utilizado para los diseños de pavimentos asfálticos en el Ecuador es de tamaño máximo nominal de $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm) y los valores para este tipo de estructura granular se encuentra en la Tabla 7. Esta faja granulométrica se utiliza en gran parte en especificaciones internacionales, ya que presenta un comportamiento adecuado del pavimento flexible dentro de su vida útil, comprobada por investigaciones realizadas con este esqueleto granular y que en la actualidad se sigue manteniendo. Adicionalmente continúa desarrollando variaciones granulométricas con estructuras granulares densas, puesto que son favorables para controlar los efectos de las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas en caliente (HMA) y como resultado de este tipo de mezclas, es poseer menos vacíos en el aire y mayor contacto entre partículas, a diferencia de una granulometría abierta (Delgado et al., 2006).

Investigadores como Brown & Pell (1974) han definido que mezclas con graduación abierta de tipo discontinuas, exhiben mayor deformación que las mezclas con graduación densa. Así mismo Cooper et al. (1985) afirman que las estructuras granulares densas ofrecen valores de VAM adecuados, incrementan la resistencia a la degradación durante la construcción y bajo el tráfico, así mismo presenta un excelente comportamiento a la falla por fatiga cuando se usan en pavimentos de espesor grueso. En cambio, Hicks et al. (1972) han analizado mezclas con granulometría abierta que han presentado buena resistencia a la deformación plástica así también es aconsejable tener una graduación en la cual tenga contacto agregado con agregado en los agregados gruesos (Delgado et al., 2006).

En definitiva, existen algunas opiniones de expertos acerca del tipo de gradación, rango de fino y grueso para granulometrías abiertas (open graded) y discontinuas (gap graded) o Stone Matrix Asphalt (SMA), ofrecerá mejor desempeño, pero se definirán la estructura ideal dependiendo de los agregados y el comportamiento que se quiera lograr (Delgado et al., 2006).

En la tabla 8, se presenta otros criterios para definir el porcentaje idóneo referente a tamaños de agregados para diseño de pavimentos flexibles tanto para graduación gruesa como fina, que nos permite establecer rangos más cercanos para la selección de entono granulométrico que ofrezca un desempeño adecuado del pavimento.

Tabla 8

Porcentajes de graduación para las HMA.

NMS de la Mezcla	Graduación Gruesa	Graduación Fina
37,5 mm	<47% Pasando Malla de 9.5	>47% Pasando Malla de 9.5
25,0 mm	<40% Pasando Malla de 4.75	>40% Pasando Malla de 4.75
19,0 mm	<47% Pasando Malla de 4.75	>47% Pasando Malla de 4.75
12,5 mm	<39% Pasando Malla de 2.36	>39% Pasando Malla de 2.36
9,5 mm	<47% Pasando Malla de 2.36	>47% Pasando Malla de 2.36
4,75 mm Malla N°4	N/A Graduación Superpave	

Fuente: García y Hansen (2002). Guía para Seleccionar el Tipo de Mezcla Asfáltica en Caliente HMA para Pavimentos.

2.3.4. Parámetros volumétricos

Los parámetros de calidad para un diseño de pavimento flexible se basan principalmente en los requisitos volumétricos del diseño Marshall y entre las componentes volumétricas importantes que intervienen está el porcentaje de vacíos en el aire, que se encuentra entre el 3 - 5%, valores que están basados en los volúmenes de tránsito estimados para la vida útil de diseño del pavimento asfáltica (Garnica et al., 2005a). Dentro de los restantes parámetros volumétricos se encuentran: Vacíos del agregado mineral, vacíos llenos de asfalto y contenido de asfalto. En cambio, respecto a requisitos de comportamiento del espécimen se hallan estabilidad y flujo, aspectos que se encuentran en las tablas 9 y 10, donde se observan las exigencias volumétricas para una mezcla asfáltica bajo normativa ecuatoriana.

Tabla 9

Vacíos del agregado mineral, según especificaciones del MTOP para-Ecuador.

Tamiz		Vacíos mínimos en Agregado (%)
2 in	(50 mm)	11.50
1½ in	(37,5 mm)	12.00
1 in	(25,0 mm)	13.00
¾ in	(19,0 mm)	14.00
½ in	(12.5 mm)	15.00
⅜ in	(9,50 mm)	16.00
Nº4	(4,75 mm)	18.00
Nº8	(2,36 mm)	21.00

Nota: El número tamiz corresponde al tamaño máximo nominal del agregado para la elaboración de un diseño de mezcla asfáltica.

Fuente: NEVI-12-MTOP (2013). Especificaciones Técnicas del Ecuador.

Tabla 10

Requisitos de ligantes, según especificaciones del MTOP para Ecuador.

Parámetros de Diseño	Unidades	Clase de Mezcla		
		A	B	C
Marshall (MTC E 504)				
1. Estabilidad	kg	815	544	453
2. Flujo	mm	8-14	8-16	8 – 2
3. Vacíos con aire	%	3 - 5	3 - 5	3 - 5
4. Compactación del testigo por capa	# golpes	75	50	50
5. Vacíos llenos de Asfalto	%	65 - 78	65 - 75	65 - 75
Inmersión - Compresión (MTC E 518)				
1. Resistencia a la Compresión (mínimo)	MPa	2,10	2,10	1,40
2. Resistencia Retenida (mínimo)	%	70	70	70

3. Prueba de tracción indirecta (mínimo)	%	70	70	70
4. Relación Polvo – asfalto		0.6-1,3	0.6-1,3	0.6-1,3
5. Relación Est./ Flujo		1700 -2500		

Fuente: NEVI-12-MTOP (2013). Especificaciones Técnicas del Ecuador.

Cabe indicar que los valores de las Tablas 9 y 10, son tomados de la normativa del Ministerio de Transporte y Obras públicas del Ecuador, que tienen similitud con las exigencias del método Marshall.

2.3.5. Prueba de mezcla asfáltica compactada por el método Marshall

El método Marshall desarrolla tres tipos de ensayos con la finalidad de conocer las características volumétricas y mecánicas.

2.3.5.1. Determinación de la gravedad específica. Esta prueba se la realiza después de que el espécimen haya enfriado al menos un cuarto de su temperatura y ejecuta con el procedimiento de la norma ASTM D1188 (empleando parafina); o ASTM D2726 (utilizando especímenes secos)(Garnica et al., 2005b)

2.3.5.2. Prueba de estabilidad y flujo. Luego de haber determinado la gravedad específica, se desarrolla la prueba de estabilidad y flujo, que consiste en sumergir el espécimen en un baño María a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 30 a 40 min antes del ensayo y finalmente someter los testigos a pruebas de carga en el equipo Marshall. Dicha carga que se aplica al espécimen debe ser a una deformación constante de 51 mm 5 segundos por 1 minuto, hasta que ocurra la falla(Garnica et al., 2004a)

2.3.5.3. Análisis de densidad y vacíos. Para realizar este ensayo se debe determinar la gravedad específica teórica máxima (ASTM D2041) para al menos dos contenidos de asfalto, específicamente que se encuentren cerca del cometido óptimo de asfalto(Garnica et al., 2004a)

“Utilizado la gravedad específica y la gravedad específica efectiva del total del agregado, así como el promedio de las gravedades específicas de las mezclas compactadas, la gravedad específica del asfalto y la gravedad específica teórica máxima de la mezcla asfáltica, se calcula el porcentaje de asfalto absorbido en peso de agregado seco, porcentaje de vacíos (Va), porcentaje de vacíos llenados con asfalto (VFA), y el porcentaje de vacíos de agregado mineral (VMA)”(Garnica et al., 2005b, p. 15)

2.4. Método de diseño de mezclas asfálticas con metodología Superpave a Nivel

I

El método fue desarrollado entre octubre del 1987 y marzo de 1993, por el programa estratégico de investigación en carreteras Strategic Highway Research Program (SHRP) que fue financiado por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares, con el fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras, volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores (Minaya y Ordoñez, 2003).

Garnica et al. (2005b) señala que la tecnología Superpave sustancialmente constituye un sistema más avanzado que el método Marshall, puesto que propone especificaciones detalladas de las componentes (agregado ligante) de la mezcla y el comportamiento cuando interaccionan al mezclarse, también el análisis y predicción en el desempeño del pavimento. La secuencia que propone el sistema Superpave para diseñar un firme flexible se resumen de la siguiente manera(Corona, 2017, p. 20).

1. Elección de agregados y cementante que satisfagan con las especificaciones de diseño.
2. Acondicionar una mezcla de agregado-ligante asfáltico que cumpla requerimientos de la tecnología Superpave.
3. Mezclado el cementante (envejecido a corto plazo) y la mezcla del agregado mineral.
4. Compactar la mezcla asfáltica usando el compactador giratorio Superpave en relación a los niveles de tráfico considerados.
5. Evaluar el comportamiento de los parámetros volumétricas del pavimento flexible.
6. Seleccionar el diseño del pavimento flexible adecuado que satisfaga los parámetros específicos del tipo de estructura que se vaya a colocar; y
7. Efectuar pruebas de sensibilidad a la humedad de la mezcla realizada.

2.4.1. Pruebas de agregado mineral

Las características de la estructura granular son importantes en el comportamiento del firme flexible y en el sistema Superpave constituyen una parte del procedimiento en la elaboración del diseño de un pavimento flexible y para el control de los diferentes tamaños del sistema granular, se clasifica en pruebas de consenso y de origen(Garnica et al., 2005b)

2.4.1.1. Propiedades de consenso. Las propiedades de consenso del método Superpave son: Angularidad del agregado grueso (ASTM D5821); Angularidad del agregado fino (AASHTO TP 33); partículas Alargadas y Aplanadas (ASTM D4791); y equivalente de arena (ASTM D2419)(Delgado et al., 2006).

El sistema Superpave establece exigencias de calidad de la estructura granular y por intermedio de la evaluación de propiedades de consenso se comparan con las exigencias que se encuentran en la tabla 11 descrita a continuación(Garnica et al., 2005a).

Tabla 11*Requisitos de propiedades de consenso - método Superpave.*

Millones de ESALs ⁽¹⁾	Angularidad del agregado grueso % mínimo		Angularidad del agregado fino % mínimo		Equivalente de arena % mínimo	Partículas alargadas % mínimo ⁽³⁾
	Distancia desde la superficie (S)					
	S<100 mm	S>100 mm	S<100 mm	S>100 mm		
< 0,3	55/-	-	-	-	40	-
0,3 < 3	75/-	50/-	40	40	45	
3 < 10	58/80 ⁽²⁾	60/-	45	40	45	10
10 < 30	95/90	80/75	45	40	45	
≥30	100/100	100/100	45	45	50	

Notas: ⁽¹⁾ Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado en el carril de diseño para un periodo de 20 años. Independientemente de la vida de diseño actual de la carretera, determine los ESALs de diseño para 20 años y selecciona el nivel Nss apropiado.

⁽²⁾ 85/80 indica que el 85% del agregado grueso tiene una o más caras fracturadas, y 80% tiene dos o más caras fracturadas

⁽³⁾ Criterio basado en una relación máxima a mínima de 5:1

Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización Geomecánica de mezclas.

2.4.1.2. Propiedades de origen. Dentro de estas propiedades están consideradas el ensayo de los Ángeles, la durabilidad por intermedio del ensayo de interperismo y por último el ensayo de deletéreos (Garnica et al., 2005b). El método Superpave recomienda parámetros en dichas características que se indica en la tabla 12.

Tabla 12*Valores recomendados para propiedades de origen- método Superpave.*

Desgaste de los Ángeles (% máximo)	Salinidad del agregado sulfatos (% máximo)	Contaminantes en agregado grueso (% máximo)
35 -45	10-20 ⁽¹⁾	0,2-10 ⁽²⁾
Notas:	⁽¹⁾ Para cinco ciclos	⁽²⁾ Dependiendo de la composición exacta del contaminante

Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.

La metodología Superpave tiene grandes avances en la selección del ligante asfáltico. Sin embargo, la particularidad existe cuando sucede la interacción entre la estructura granular

y el cementante, puesto que las características del esqueleto mineral son determinantes para la deformación permanente.

En la investigación realizada por el National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board (NCHRP) Report 405(P. Kandhal & Parker, 1998), indica que para evaluar el rendimiento de los pavimentos flexibles, es importante efectuar un control al agregado mineral y las principales características que deben determinarse son: el porcentaje de partículas chatas y alargadas, equivalente de arena para obtener la cantidad de finos plásticos, azul de metileno y angularidad del agregado fino y grueso, ya que los valores adecuados de estos aspectos son indispensables para evaluar el comportamiento de los pavimentos flexibles a deformación permanente, agrietamiento por fatiga, raveling, stripping (Minaya y Ordoñez, 2003).

En la tabla 13, se presenta un detalle de deterioros que sufre los pavimentos en función de las características del agregado mineral.

Tabla 13

Ensayos de agregados para evaluar fallas en los pavimentos flexibles.

Propiedades de agregados	Agrietamiento por fatiga	Deformación permanente	Raveling	Stripping
Graduación y tamaño	X	X		
Contenido de vacíos no compactados del agregado grueso	X	X		
Contenido de vacíos no compactados de agregados finos				X
Ensayo azul de Metileno para agregados finos				X
Ensayo azul de Metileno para materiales que pasan N°200				X
Ensayo de abrasión Micro-Deval			X	
Resistencia al sulfato de magnesio			X	
Análisis de las partículas que pasan la N°200		X		X

Fuente: Minaya y Ordoñez (2003). Superpave y el Diseño de Mezclas Asfálticas.

2.4.2. Pruebas de ligante asfáltico

La metodología Superpave para cementos asfálticos es más exigente, principalmente miden las características físicas relacionadas con el desempeño del pavimento asfáltico y para evaluar el ligante se lo comprueba bajo tres etapas: primeramente se realizan pruebas de transporte, almacenamiento y manejo, seguidamente se efectúan ensayos respecto a su producción, mezcla y construcción, esta secuencia es simulada por las especificaciones que se realizan en el ensayo de envejecimiento del asfalto al horno rotatorio de película delgada (RTFO); dicho procedimiento muestra el comportamiento de una película delgada de asfalto a

calor y aire con la finalidad de representar el envejecimiento que sufre el asfalto durante su mezcla y construcción. Y por último se analiza cuando envejece el ligante asfáltico desde que se coloca, hasta el final de su vida útil a la cual fue diseñado. En este proceso se elabora sometiendo el cementante en una vasija de envejecimiento a presión (PAV), donde la exposición de muestras de asfalto a calor y presión, simula el envejecimiento en años de servicio del pavimento (Garnica et al., 2005b).

Otra particularidad de sistema Superpave es establecer nuevas especificaciones, con la finalidad de estimar el comportamiento visco elástico del ligante. Para lo cual se utiliza el equipo reómetro de corte directo (DSR), que sirve para valorar fallas como: Ahuellamiento (deformaciones permanentes) definido por el factor $G^* / \sin \delta$, que se forma por la medida de la rigidez del ligante a elevadas temperaturas (McGennis et al., 1994). También se encuentra el deterioro a la fatiga del pavimento flexible, que en general se produce al terminar la vida útil del firme flexible y es determinado por el factor $G^* \sin \delta$ que representa la resistencia al agrietamiento por fatiga. Así mismo tenemos las fisuras producidas por bajas temperaturas que son determinadas por el equipo reómetro de viga a deflexión (BBR), con el resultado de este ensayo, permite analizar al cemento asfáltico cuando se fisura por cambios bruscos de temperatura de altas a bajas (León y Villao, 2017). En la Tabla 14, se logra ver un detalle de los dispositivos y pruebas que permiten evaluar el comportamiento del cemento asfáltico bajo la metodología Superpave.

Con los resultados conseguidos en las pruebas antes indicadas del sistema Superpave se determina la categorización del ligante tanto en función del grado de desempeño (PG) como la relación que existe en las temperaturas de servicio del pavimento. El grado PG consigue diseñar un ligante apropiado para la región donde se vaya a colocar y depende fundamentalmente del clima dominante y de la magnitud de tránsito a la que quedará sujeta la vida útil del firme flexible (Garnica et al., 2005b)

Tabla 14

Designación de pruebas de cemento asfáltico - método Superpave.

Equipo	Caracterización
Horno rotatorio de película delgada (RTFO) Vasija de envejecimiento a presión (PAV)	Describe características de envejecimiento del asfalto
Reómetro de corte dinámico (DSR)	Define propiedades del cemento asfáltico a temperaturas altas e intermedias
Viscosímetro rotacional (RV)	Define propiedades del cemento asfáltico a altas temperaturas
Reómetro de viga en flexión (BBR) Ensayo de tensión directa (DTT)	Define propiedades del cemento asfáltico a bajas temperaturas

Fuente: Garnica et al. (2005b). Análisis Comparativo de los Métodos Marshall y Superpave para Compactación de Mezclas asfálticas.

2.4.3. Grado de desempeño del cemento asfáltico (PG)

Entre las necesidades importantes de los pavimentos está la selección del ligante asfáltico y su estructura molecular es susceptible térmicamente esto significa que el desempeño del cementante depende considerablemente del clima donde se utilice, con este razonamiento. El sistema Superpave implementa ensayos avanzados del ligante, con la finalidad de conocer la temperatura que espera el pavimento en la región donde se construye y si el producto no cumple con las condiciones del sector, permite diseñar un ligante apropiado para esa zona climática.

Como ya se indicó anteriormente los ligantes son caracterizados de acuerdo al desempeño esperado e influyen considerablemente para identificar tipos de deterioros como el ahuellamiento fatiga y agrietamiento térmico, demostrándose que para distinta temperatura se produce una falla específica.

Delgadillo et al. (2017), define que el resultado del PG del ligante asfáltico consta de tres temperaturas expresadas en grados Celsius, y que están identificadas como altas medias y bajas, donde dichas temperaturas están asociadas al deterioro del pavimento. La relación que existe entre el deterioro y temperatura se indican a continuación:

- Resistencia al ahuellamiento hasta la máxima temperatura.
- Resistencia al agrietamiento térmico hasta la mínima temperatura baja.
- Resistencia a la fatiga hasta la temperatura menores o iguales a la intermedia.

Según el método Superpave hay tres modelos matemáticos para determinar el grado de ligantes asfáltico, que se indica a continuación: Áreas geográficas, permite desarrollar un mapa geográfico basado en el clima y/o ubicación política, las temperaturas del pavimento, que sirven para identificar la temperatura del diseño de la estructura flexible y por último la temperatura del aire, en cambio para establecer la temperatura del aire a la cual se cristalizará la temperatura del diseño del firme flexible. Con esta información se puede elaborar un mapa, que ubique un PG para cada región de estudio y diseñar un ligante asfáltico correspondiente a cada zona (Vintimilla, 2014).

En las tablas 15 y 16, se establecen ensayos y límites que debe cumplir el cemento asfáltico y que bajo estas condiciones se puede categorizar al ligante en qué grado de desempeño se encuentra.

Tabla 15*Especificación 1. AASTHO para clasificación Superpave.*

Grado de comportamiento	PG 46				PG 52				PG 58				PG 64								
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40
Temperatura máx de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	46				52				58				64								
Temperatura mínima de diseño del pavimento °C	>-34>-40>-46>-10>				>-16>-22>-28>-34>-40>-46>-16>				>-22>-28>-34>-40>-10>				>-16>-22>-28>-34>-40								
Asfalto original																					
Punto de Inflamación (AASHTO T 48) °C mín	230																				
Viscosidad dinámica a 135°C (AASHTO D 4402) Pa.s máximo	3,00																				
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa mín. Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	46				52				58				64								
Después de la prueba delgada (T240) o residuo horno de la película (T179)																					
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1,00																				
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa mín. Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	46				52				58				64								
Después del envejecimiento en vasija de presión, temperatura y aire																					
Temperatura de envejecimiento PAV; °C	90				90				100				100								
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa máximo. Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Índice de endureciendo físico máximo	Reportar																				
Rigidez de flexión S(t); Mpa, máximo (m*0,3 mín)	300																				
Temperatura de prueba @ 60s, °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión directa (TP3) Deformación a la falla, % mínimo	1,00																				
Temperatura de prueba @ 1,0 mm/mín. °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.

Tabla 16*Especificación 2. AASTHO para clasificación Superpave.*

Grado de comportamiento	PG 70						PG 76						PG 82					
	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	
Temperatura máx de diseño del pavimento (promedio de 7 días), °C	<70						<76						<82					
Temperatura mínima de diseño del pavimento °C	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	
Asfalto original																		
Punto de Inflamación (AASHTO T 48) °C mín	230																	
Viscosidad dinámica a 135°C (AASHTO D 4402) Pa.s máximo	3,00																	
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa mín.	1,00																	
Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	70						76						82					
Después de la prueba delgada (T240) o residuo horno de la película (T179)																		
Pérdida por calentamiento; %, máximo	1,00																	
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa mín.	2,20																	
Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	70						76						82					
Después del envejecimiento en vasija de presión, temperatura y aire																		
Temperatura de envejecimiento PAV;°C	100						100						100					
* En climas Normales	110						110						110					
* En climas desérticos	110						110						110					
Módulo reológico de Corte Dinámico (TP5): (G*/sinδ, kPa máximo	5000																	
Temperatura de rueda @ 10 rad/seg, °C	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	22	40	37	34	31	28		
Índice de endureciendo físico máximo	Reportar																	
Rigidez de flexión S(t); Mpa, máximo (m*0,3 mín)	300																	
Temperatura de prueba @ 60s, °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		
Tensión directa (TP3) Deformación a la falla, % mínimo	1,00																	
Temperatura de prueba @ 1,0 mm/mín. °C	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24		

Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.

2.4.4. Límites de granulometría método Superpave a Nivel I

Para determinar la granulometría, el sistema Superpave realiza una innovación con respecto al método Marshall, que consiste en modificar la curva granulométrica (gráfica Fuller) al elevar la abertura de las mallas al exponente (0.45), este cambio permite una adecuada colocación del agregado mineral tanto naturales como artificiales, como también la línea recta refleja la configuración de la densidad máxima del esqueleto granular para una HMA. La representación de la gráfica se forma por las ordenadas de la carta que constituyen la cantidad que pasan en escala aritmética, en cambio la abscisa simboliza los tamaños de los tamices en mm elevados al exponente 0.4(Garnica et al., 2004a).

Una condición relevante de esta gráfica es la línea de máxima densidad, que pertenece a una línea recta extendida desde la abscisa de tamaño máximo del esqueleto granular y ordenada 100% hasta el origen (0%,0 mm). La gráfica granulométrica de la máxima densidad simboliza a la estructura granular como la forma más idónea de acomodarse entre sí las partículas de agregado, formando una distribución volumétrica más compacta posible. Indudablemente, esta graduación debe evadirse debido a que tendría insuficiente espacio entre los minerales para la entrada de la película de ligante lo suficientemente gruesa, este comportamiento produciría problemas de durabilidad de los pavimentos(Garnica et al., 2004a).

Otra componente que se debe incluir para definir las granulometrías de Superpave, es en identificar el tamaño máximo nominal, que consiste en un tamaño de la malla mayor a la primera malla que retiene el 10% del material; como también el tamaño máximo que no es otra cosa que el tamaño de malla mayor al tamaño máximo nominal que son tomadas de las definiciones de las normas ASTM(Delgado et al., 2006).

También el esqueleto granular del sistema Superpave se utilizan dos criterios adicionales: Puntos de Control y Zona Restringida. Los puntos de control, son puntos de paso obligatorio para el esqueleto granular y dependen necesariamente del tamaño máximo nominal del mineral, de un tamaño intermedio malla N°8(2.36 mm) y un tamaño de finos N°200(0.075 mm). La idea básica para la selección de los puntos de control es cumplir con el esclarecimiento del tamaño máximo nominal y tamaño máximo(Delgado et al., 2006).

Los cuatro puntos de control superiores sirven para verificar que del 90 a 100% pasando la malla del tamaño máximo nominal y 90% máximo que pasa la malla menor inmediata que la del tamaño máximo nominal (Delgado et al., 2006).

Los cuatro puntos de control se usan para restringir la gráfica de diseño de la mezcla en los tamaños N° 200 y N° 8. Estos requerimientos máximos y mínimos para la malla N°200 (75 μ m), son generalmente para estructuras granulares de graduación cerrada. En cambio, los puntos de control para la malla N°8 (2,36 mm), sirven para controlar el agregado mineral de arena en los firmes flexibles. El punto superior restringe el porcentaje de arena en la granulometría de diseño con el propósito de impedir que existan esqueletos granulares arenosos los cuales totalmente no cumplen con las normativas. Por lo contrario, el punto inferior proporciona un porcentaje de arena apropiada para satisfacer con las especificaciones de una

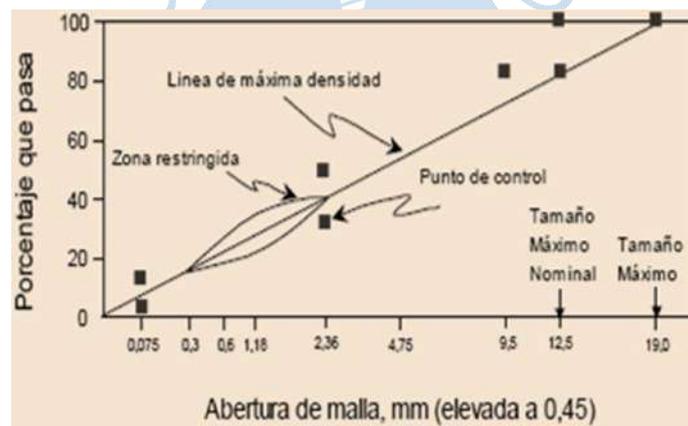
graduación densa. Un diseño con graduación abierta o diseño de estructura granular permeable no cumple con dichos puntos de control(Delgado et al., 2006).

El otro requerimiento de la granulometría Superpave es la zona restringida y ha sido implantada con la finalidad de proporcionar una apropiada graduación en el pavimento flexible, se sitúa entre los tamices intermedios (4,75 o 2,36 mm) y 0,3 mm. Forma una curva en la cual la gráfica del esqueleto granular no deberá pasar. Se detalla que la graduación que pasan por arriba de la zona posee exceso de material fino (arenosos) y proporcionan pavimentos flexibles con agregados endebles en comparación con las que pasan bajo la sección restringida(Delgado et al., 2006).

Así mismo, estructuras granulares que ingresan al área restringida tienen una estructura granular endeble que depende demasiado de la rigidez del ligante para alcanzar una excelente resistencia al corte en el firme flexible. La figura 6 indica un esquema del comportamiento de la granulometría Superpave (Delgado et al., 2006).

Figura 6

Límites para granulometrías Superpave.



Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización geomecánica de Mezclas Asfálticas.

Existe una discrepancia con respecto a la graduación de los agregados referente a la zona restringida, ya que después de algunos años de estar utilizando este criterio; los investigadores de la Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP- Cooperativa Nacional de investigación de Carreteras) desarrollo una nueva investigación de título NCHRP report 464 The Restricted Zone in the Superpave Agregate Gradation Specification, para analizar las recomendaciones iniciales del sistema Superpave. Donde determinaron que estos criterios de diseño de mezclas asfálticas se implantaron por consenso sin un proceso práctico, en los criterios incluyó la revisión del área restringida por la cual recomiendan no pasar los esqueletos granulares por esta zona y que básicamente se implementó en función de acuerdos y desacuerdos más no con un proceso científico. Dentro de estos acuerdos la mayoría de los técnicos normaron graduaciones arriba y debajo de la zona restringida, aunque la mitad de ellos recomendaron graduaciones debajo de la zona restringida para altas condiciones de tráfico(Delgado et al., 2006).

La zona de restricción fue implantada en la metodología Superpave como una guía recomendada, y no como una normativa requerida, pero algunas agencias en USA la implementaron como una exigencia. Según este criterio, para incluir una sección restringida en un diseño de mezclas asfálticas se debe a dos aspectos fundamentales: el primero, es porque algunas granulometrías se diseñan con arenas naturales redondeadas y el segundo, es por la proporción aceptable de la porción fina (0,15 a 0,6 mm) del total de la arena (que pasa por 2,36 mm), con la finalidad de disminuir o evitar la presencia de roderas en el pavimento asfáltico(Delgado et al., 2006).

Retomando el reporte Proyecto “Report 464 The Restricted Zone en the Superpave Agregate Gradación Specification” algunos investigadores en USA(Chowdhury et al., 2001); (P. Kandhal & Mallick, 2001), exponen que aplicar el criterio de la zona restringida, tal vez no es aconsejable ni obligatorio realizar diseños de mezclas puesto que no ofrecen un desempeño adecuado referente a deterioros por deformación permanente y fatiga. En experiencias de construcción de pavimentos flexibles en USA, ellos han producido mezclas con graduación que pasan dentro de la zona restringida, proporcionando un buen comportamiento. Adicionalmente incluyen otro factor importante respecto a la trituración de los agregados, donde explican, que la importancia de la forma y textura del agregado mineral fino se ve reflejado en un alto valor de angularidad del agregado fino y este permite al pavimento que no exhiba problemas de roderas durante la construcción y ofrece resistencia al ahuellamiento bajo tráfico, así esta estructura granular pase a través de la zona restringida. Así mismo cuestionaron el uso de la zona restricción preferentemente cuando las mezclas requieren propiedades volumétricas como VAM y Va, para especificaciones respecto a números de giros Ni inicial, Ni diseño y Ni máximo en la compactación giratoria.

Tomando como referencia la publicación NCHRP Report 464 lograron determinar que la zona de restricción no debe tomarse ni como una guía ni como un requerimiento, sin tomar en cuenta el tamaño del agregado o nivel de tráfico. Algunas agencias han usado la zona de restricción para diferenciar graduaciones finas y gruesas. Dentro de esta investigación determinaron que el tipo de agregado grueso tiene un significativo efecto en los valores de VAM de las mezclas y el porcentaje de la gravedad específica teórica máxima. También analizaron cada zona de la estructura granular y concluyeron lo siguiente(Delgado et al., 2006):

- Mezclas sobre la zona de restricción y entrecruzada, significa que la ubicación de gráfica inicia en la parte baja atraviesa el área de restricción y continua hacia arriba de la zona de restricción, proveen de valores elevados de VAM.
- Diseños con gráficas granulares que cruzan la zona restringida, en cambio tienen valores bajos de VAM.
- Mezclas con granulometrías de agregado fino ubicadas sobre la sección restringida tienen valores altos de porcentajes de gravedad específica teórica máxima, en relación a esqueletos granulares que se ubican a través o bajo el área de restricción.

- Altos valores porcentaje de angularidad del agregado fino no necesariamente producen elevados valores de VAM en mezclas, pero proporcionan bajos valores de % de gravedad específica teórica máxima.

Para finalizar, en recientes investigaciones se ha demostrado que tanto las graduaciones finas como las graduaciones gruesas que pasan sobre y abajo respectivamente de la zona de restricción no presentan diferencias considerables en la profundidad de roderas y que los dos esqueletos granulares cumplen con parámetros volumétricos, como también poseen un desempeño adecuado (P. Kandhal & Cooley, 2002).

En las tablas 17 y 18, se encuentran las especificaciones respecto a los puntos de control y zona restringida para los tamaños máximos nominales de agregados más comunes.

Tabla 17

Especificación de la gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal 19 mm.

Abertura (mm)	(Abertura) ^{0.45}	Puntos de control		Zona restringida	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,00	4,26		100,00		
19,00	3,76	90,00	100,00		
12,50	3,12		90,00		
9,50	2,75				
4,75	2,02				
2,36	1,47	23,00	49,00	34,60	34,60
1,18	1,08			22,30	28,30
0,60	0,79			16,67	20,70
0,30	0,58			13,70	13,70
0,08	0,31	2,00	8,00		

Fuente: Delgado et al. (2006). Influencia de la Granulometría en las Propiedades Volumétricas de la Mezcla Asfáltica.

Tabla 18

Especificación de la gráfica de Fuller para un tamaño máximo nominal 12,5 mm.

Abertura (mm)	(Abertura) ^{0.45}	Puntos de control		Zona restringida	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
25,00	4,26				
19,00	3,76		100,00		
12,50	3,12	90,00	100,00		
9,50	2,75		90,00		
4,75	2,02				
2,36	1,47	28,00	58,00	39,10	39,10
1,18	1,08			25,60	31,60
0,60	0,79			19,10	23,10
0,30	0,58			15,50	15,50
0,08	0,31	2,00	10,00		

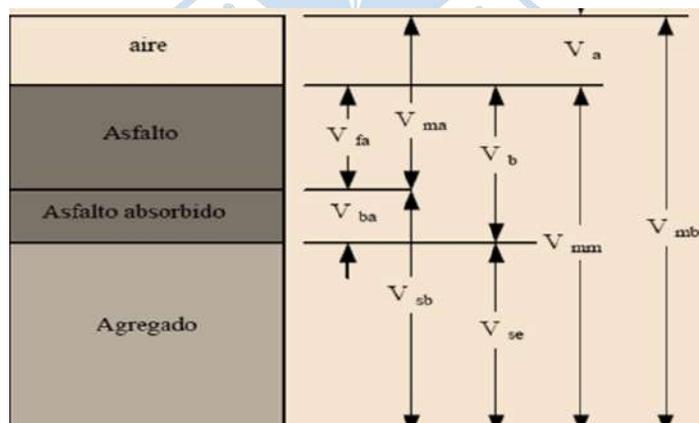
Fuente: Delgado et al. (2006). Influencia de la Granulometría en las Propiedades Volumétricas de la Mezcla Asfáltica.

2.4.5. Parámetros volumétricos

Para la metodología Superpave los requerimientos volumétricos que utiliza son: vacíos de aire, vacíos en el agregado mineral, vacíos llenos de asfalto y contenido de asfalto efectivo, estos facilitan un adecuado desempeño del pavimento flexible siempre y cuando sean seleccionados adecuadamente (Garnica et al., 2004a). En la figura 7 se describe un diagrama de componentes de una mezcla asfáltica.

Figura 7

Diagrama de componentes de una HMA.



Fuente: Garnica et al. (2004a). Aspectos del diseño volumétrico de Mezclas Asfálticas.

Donde:

V_{ma} = Volumen de vacíos en agregado mineral.

V_{mb} = Volumen total de la mezcla asfáltica.

V_{mm} = Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos.

V_{fa} = Volumen de vacíos llenados con asfalto.

V_a = Volumen de vacíos de aire.

V_b = Volumen de asfalto.

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido.

V_{sb} = Volumen de agregado mineral (Gravedad específica de la masa).

V_{se} = Volumen de agregado mineral (Gravedad específica efectiva).

Los valores mínimos especificados en el sistema Superpave respecto a las propiedades volumétricas para el diseño de pavimento flexible se indican en la tabla 19.

Tabla 19

Requisitos volumétricos del diseño de mezclas Superpave.

Millones de ESALS ⁽¹⁾	Gravedad específica máxima Teórica de la mezcla (Gmm)			VMA Porcentaje mínimo					VFA
	N inicial	N diseño	N máxima	Tamaño nominal máximo (mm)					Porcentaje mínimo
				37.50	25.00	19.00	12.50	9.50	
< 0,3	≤91,5	-	-						70-80 ⁽²⁾
0,3 < 3	≤90,5								65-75 ⁽²⁾
3 < 10		96	≤98	11 ⁽⁴⁾	12.00	13.00	14.00	15.00	
10 < 30	≤89,0								65-75 ⁽³⁾
≥30									

Notas:

- (1) Los ESALs de diseño son los niveles de tránsito de proyecto esperado, para un periodo de diseño de 20 años.
- (2) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 9,5mm, el rango de VFA especificado de ser de 73% a 76% para los niveles de tránsito de diseño ≥ 3 millones de ESALs.
- (3) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 25mm, los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 66% para niveles de tránsito de diseño < 3 millones de ESALs.
- (4) Para mezclas de agregado de tamaño nominal máximo de 37,5mm, los límites inferiores especificados de VFA deben ser de 63% para todos los niveles de tránsito de diseño.

Fuente: Garnica et al. (2005a). Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas.

2.5. Desempeño de mezclas asfálticas en caliente

Uno de los avances más relevantes en la investigación del diseño de estructuras flexibles por el programa SHRP, es evaluar el desempeño del pavimento y para ello implementaron

pruebas de revisión de calidad de las mezclas asfálticas, producto de esto descubrieron parámetros de comportamiento de HMA con la finalidad de predecir y corregir oportunamente la vida útil del pavimento. Este procedimiento tecnológico surge aproximadamente hace dos décadas y los países desarrollados aplican esta metodología para realizar pruebas de desempeño ante fallas por: fatiga, ahuellamiento, susceptibilidad térmica, entre otras, en el control de calidad de sus pavimentos (Botasso et al., 2017).

Por los años noventa en USA se implementa un método de diseño de pavimento flexible llamado Superpave, el cual está formado por tres características principales (Vila y García, 2015):

1. Especificaciones del cementante para evaluar su comportamiento.
2. Procedimiento para elaborar del diseño de pavimento flexible.
3. Métodos de análisis para pronosticar el comportamiento del firme flexible

Para evaluar el desempeño de HMA con el método Superpave, se utilizan dos procedimientos de ensayos: el primero con el equipo de corte Superpave (SST) y el segundo de tracción indirecta (IDT), pero debido a su complicación y sobre todo a la falta de consenso sobre sus capacidades para pronosticar el comportamiento, se han utilizado de manera restringida para eventuales diseños experimentales (McDaniel, 2007). En USA, para evaluar el desempeño de mezclas asfálticas han desarrollado alternativas de pruebas simples (SPT), que comprende básicamente el módulo dinámico a compresión, tiempo y número de flujo (Vázquez et al., 2009). En cambio, en la Unión Europea, las especificaciones para un diseño de pavimento flexible se basan en la normativa CEN EN 13108-1 (2008) que plantea dos condiciones: El empírico, basado en controles volumétricos de susceptibilidad del agua y ensayo en pista; y, el fundamental, mediante pruebas de comportamiento, donde se controla la rigidez, la resistencia a la deformación permanente en prueba a compresión cíclica triaxial y la resistencia a la fatiga sobre vigas trapezoidales o prismáticas (Vila y García, 2015).

Por las múltiples investigaciones desarrolladas en función del desempeño de las HMA en algunos países de Norte América y Europea, surge el requerimiento de plantear en Ecuador, una propuesta de investigación, la cual fue desarrollada por Universidad Católica de Santiago de Guayaquil en el Laboratorio de Carreteras (Suelos y Asfaltos). La misma que presenta exigencias claras y parámetros que debería cumplir el pavimento, con la finalidad de mejorar el desempeño para tráfico pesado, es decir que los pavimentos flexibles deben ser sometidos a un estudio detallado que incluya el módulo de rigidez para cuantificar el comportamiento ante la deformación permanente y fatiga, valores que se los puede obtener del equipo Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) (Vila y García, 2015).

El equipo NAT permite efectuar algunas pruebas de desempeño, su funcionamiento consiste en la aplicación de cargas mediante un sistema neumático con servo – control, midiéndose la fuerza asignada por el transductor de la celda de carga (Figura 8). El aparato utiliza un sistema computacional de datos de control del sistema con la finalidad de elaborar

diferentes pruebas y almacenar los datos mediante programas determinados(Vila y García, 2015).

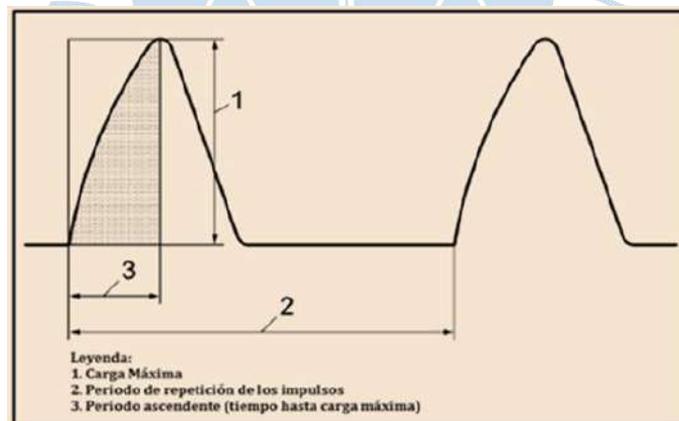
Con el dispositivo NAT (Figura 9) se puede realizar distintos ensayos como:

- Módulos de rigidez bajo la deformación de carga controlada.
- Compresión cíclica uniaxial sin confinamiento (creep dinámico).
- Pruebas de fatiga bajo dispositivo de tracción indirecta.

Para realizar el procedimiento en las tres pruebas antes mencionadas, en general utiliza las consideraciones descritas por el inventor del dispositivo(Cooper, 2002) y que son similares a las del Comité Europeo de Normalización(CEN, 2001) en lo que respecta a la asignación de cargas como también al sistema de medición y control. Sin embargo, para el caso de la prueba de compresión cíclica uniaxial la CEN establece cierto confinamiento de la muestra, ya que el plato de carga tiene un diámetro menor que el de la muestra cilíndrica a ensayar (Vila y García, 2015).

Figura 8

Forma de impulso de carga, con periodo ascendente y carga máxima.



Fuente: Corona (2017). Determinación de Módulo de Rigidez y Caracterización de Módulo Dinámico de la Mezcla Superpave.

Figura 9*Equipo NAT UN 10 Cooper.*

Fuente: Elaboración propia.

2.5.1. Resistencia a la tracción indirecta (IDT)

Esta prueba es la más empleada para evaluar a los pavimentos flexibles y su procedimiento es desarrollado en función del desempeño de las HMA del sistema Superpave, este método de prueba se caracteriza por simular el comportamiento de fallas por fatiga y bajas temperaturas convirtiéndolo en un modelo representativo, debido a que se obtiene la carga máxima que soporta la mezcla antes de romperse. En el año 1965 este método se manejaba para establecer la resistencia a la tracción indirecta, pero desde esa década ha ido mejorando su estudio hasta convertirse en una prueba con buenas perspectivas para el futuro (Montesinos y Reyes, 2010).

Actualmente es una prueba de comportamiento del pavimento que comúnmente es utilizada para determinar la resistencia a tracción del pavimento flexible, también es una metodología simple y el procedimiento está desarrollado por la norma NLT-346/90 “Resistencia a la compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas asfálticas” (Montesinos y Reyes, 2010). Con esta prueba se obtiene tanto la deformación unitaria como el módulo resiliente a tensión y al emplear modelos teóricos definidos en dichos parámetros, se puede valorar el número de aplicaciones de carga que podrá resistir la mezcla antes que se produzca la falla por fatiga (Garnica et al., 2005a). Es decir, identifica el estado de tensiones en la parte inferior de la capa del pavimento o zona de tracción. El valor de IDT obtenido de una mezcla asfáltica permite caracterizar las propiedades del pavimento asfáltico y representa el deterioro del firme flexible producida por tensiones de tracción (Corona, 2017).

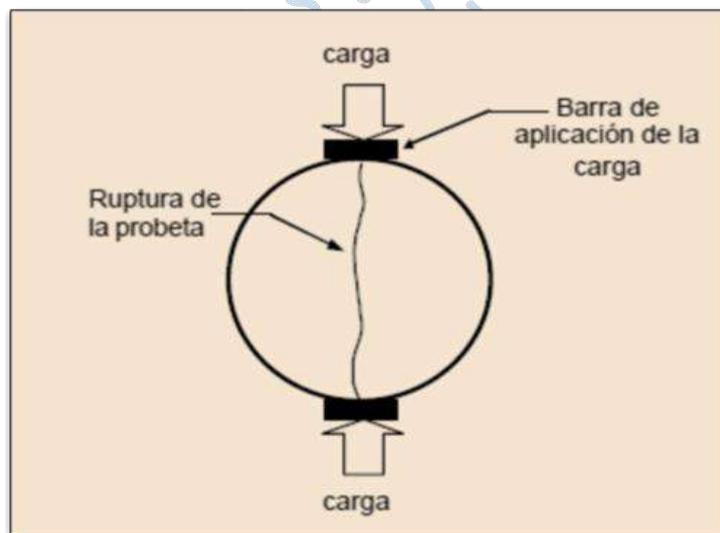
La resistencia a la tensión es un valor que indica la falla por agrietamiento del pavimento flexible, una mezcla asfáltica se puede presentar con una deformación alta a la falla, es decir que puede soportar deformaciones grandes antes de que falle, esto hace notar que probablemente

resista más al agrietamiento que un pavimento flexible con deformación baja a la falla. Así mismo, el control de la resistencia a la tensión antes y después del acondicionamiento en agua es un indicador de susceptibilidad a humedad (Garnica et al., 2005a).

Para realizar la prueba de tensión indirecta se utiliza una carga de compresión en los ejes diametrales de la probeta, la aplicación de las cargas es por lo menos de 100 kN, y su aplicación debe encontrarse a una velocidad de deformación igual 50 milímetros por minuto hasta que ocurra grieta. La carga a compresión que es aplicada por intermedio de dos barras, se convierte en un esfuerzo a tensión por la forma circular de las probetas y durante la prueba los datos obtenidos son registrados hasta que ocurra la grieta del testigo (Garnica et al., 2005a). Ver figura 10.

Figura 10

Ruptura de un testigo en el ensayo de tensión indirecta.



Fuente: Garnica et al. (2005a) Caracterización geomecánica de Mezclas Asfálticas.

Cabe indicar que la prueba de tracción indirecta parte de los conceptos básicos para el desarrollo de nuevos equipos y procedimientos, entre ellos está, el aparato Nottingham Asphalt Mix Tester (NAT) utilizado en la Unión Europea como una herramienta para obtener valores de desempeño de las estructuras flexibles referente a deformación permanente, fatiga, entre otros y que se están implementado de manera limitada en nuestro medio.

2.5.2. Módulo de rigidez

El módulo de rigidez es un parámetro necesario, su medición se realiza con equipos especializados, para obtener los resultados se efectúan pruebas tanto para probetas procesadas en laboratorio como testigos tomados de las vías. Este modelo permite simular la forma de circulación vehicular por el pavimento y para su interpretación utiliza dos condiciones:

Primeramente, se muestra cuando la rueda de un camión está a una longitud grande de un punto en la estructura flexible, en esta instancia la tensión en dicho punto es cero; y, la segunda condición es cuando la rueda se encuentra exactamente en el punto del firme flexible, en esta posición se convierte en tensión máxima. El tiempo de duración del pulso de la carga depende de la velocidad del camión y de la profundidad bajo la superficie del pavimento(Corona, 2017).

El valor de rigidez adquirido de un pavimento flexible facilita las propiedades intrínsecas del material, como también ofrece una guía de comportamiento relativo del pavimento, de esta manera se puede decir que la información obtenida provee respuestas tenso - deformacionales bajo efectos de cargas aplicadas en un estado visco-elástico lineal que se encuentra la mezcla asfáltica. El dato obtenido de rigidez no es una medida de resistencia eso quiere decir, que si un pavimento asfáltico posee un alto valor de rigidez no necesariamente tiene alta resistencia(NCAT, 2009), lo que indica realmente el módulo de rigidez es que bajo un esfuerzo aplicado produce una baja deformación en el pavimento(Vila y García, 2015).

La falla por ahuellamiento de una estructura flexible se aproxima al desempeño que posee una HMA al obtener su valor del módulo de rigidez, ya que para determinar este parámetro emplea niveles bajos de carga o deformaciones no destructivas de las probetas, dando a notar que existe un análisis real de comportamiento a la deformación permanente(Wahr et al., 2017); también existe otro método para evaluar fallas por ahuellamiento, la rueda de cargas (rueda Hamburgo) que sirve para comprobar resultados(Rivera et al., 2017).

El procedimiento de ensayo consiste en conseguir un espécimen de un pavimento bituminoso y para su elaboración, se realiza la compactación a 75 golpes por cara como lo indica la metodología Marshall, luego se coloca esta probeta en una cámara climática a temperatura de 20°C por lo menos 2 horas, posteriormente se somete a carga en el Equipo NAT, empleando un nivel de deformación controlada de cinco micrones con ondas sinusoidales y en un intervalo de tiempo de 0,12 segundos, en el que la carga aplicada aumenta de cero hasta el valor máximo(Vila y García, 2015).

Con la investigación desarrollada por Vila y García (2015) recoge todos los aspectos y proponen requerimientos para el control en el desempeño de los pavimentos flexibles recién producidas en planta, utilizando el valor del módulo de rigidez como factor de medición, que se obtiene del Equipo NAT; para lo cual proponen los siguientes criterios:

- Mezclas satisfactorias: 3000 a 4000 MPa.
- Mezclas tolerables: 2500 a 3000 MPa y 4000 a 5000 MPa.
- Mezclas inadecuadas: menores a 2500 MPa o mayores a 5000 MPa.

Con estos intervalos es posible hacer un control de las mezclas asfálticas y conocer la respuesta que tiene el pavimento ante los esfuerzos – deformaciones, y a su vez disponer parámetros de comparación para evaluar el desempeño de las HMA que se producen en Ecuador.

2.5.3. Fatiga

La fisuración de capas de rodadura asfáltica son las principales causas frecuentes de deterioro, una de las importantes fallas que se originan en los firmes flexibles es el agrietamiento por fatiga, que puede manifestarse debido a las cargas de tráfico o por sollicitaciones térmicas. El primer comportamiento de falla sucede cuando el pavimento flexible soporta numerosas cargas de tráfico, por lo general este tipo de fisuras aparecen paralelas a la zona de rodadura de la calzada y terminan integrando un modelo geométrico irregular distribuido en un conjunto de grietas interconectadas entre sí. En cambio, las sollicitaciones térmicas resaltan la contracción y dilatación del firme, debido a variaciones térmicas importantes que por lo general sucede en regiones frías o en aquellas zonas donde existan trascendentales gradientes térmicos diarios. Si la temperatura ambiental desciende, el pavimento flexible tiende a contraerse y por ende genera tensiones térmicas, pero cuando exceden la tensión máxima de la mezcla bituminosa produce una fisura en la superficie.

El deterioro por fatiga del pavimento no solo se produce por gradientes térmicas o sollicitaciones de carga, también por la combinación entre los dos aspectos de falla y cuando este comportamiento se manifiesta disminuye notablemente la vida útil del firme flexible, por tal situación se hace difícil caracterizar en conjunto la mezcla asfáltica (García et al., 2017).

Para evitar el agrietamiento por fatiga se debe evaluar a detalle factores como: el contenido de ligante, la reología de asfalto, el tipo de material fino, la temperatura y la frecuencia de cargas que tiene un gran efecto en la sensibilidad al límite de fatiga. Además, hay que tener en cuenta otro factor que influye directamente en las propiedades del betún, su envejecimiento. El envejecimiento a largo plazo del betún incide después de abrir la carretera al tráfico, y se va desarrollando durante su tiempo de servicio. Principalmente debido a la oxidación y a las características medioambientales que favorecen la interacción entre el oxígeno y el betún, generalmente el proceso de envejecimiento causa un progresivo cambio en las propiedades mecánicas y químicas del betún, que induce a un incremento en el valor de la rigidez, como también un empobrecimiento de la adhesión y reducción del recubrimiento afectando directamente a la resistencia a la fisuración (García et al., 2017)

En la investigación desarrollada por Vila y García (2015) hicieron comparaciones entre valores de fatiga correspondientes a núcleos en algunas vías y briquetas realizadas en diferentes plantas de elaboración de pavimento bituminoso para el Ecuador. El ensayo de fatiga se realiza por la prueba de tracción indirecta, que consiste en aplicar a una biqueta un esfuerzo controlado para luego determinar el número de repeticiones que se produce con dicho esfuerzo. Con la información de las pruebas de fatiga realizadas para todas las briquetas antes indicadas lograron determinar la figura 11. En la cual se representa la relación que existe entre número de repeticiones para el fallo y a deformaciones unitarias (N_f vs ϵ), determinando los siguientes límites: Si los puntos obtenidos en una prueba de fatiga para la mezcla analizada caen por debajo de la línea del percentil, el comportamiento estimado será inadecuado, si los puntos se ubican por arriba del promedio, el desempeño estimado será satisfactorio y por último si se encuentran entre ambas líneas, el comportamiento no puede garantizarse como satisfactorio, aunque pueda

d) Módulo de rigidez = S_m

4. Con cada uno de los esfuerzos controlados y el tiempo de carga 120 milisegundos se efectúa la prueba de fatiga determinando el número de repeticiones (N_f) hasta alcanzar el fallo a una deformación máxima de 5 mm.
5. El comportamiento estimado de la mezcla estará dado por la ubicación del punto (N_f, ϵ_0) en la gráfica 2.

2.5.4. Deformación permanente o plástica

Es una falla que se produce en el pavimento flexible considerado como una degradación del pavimento, el mismo que se ve reflejado a una temprana edad de su vida útil y es ocasionado principalmente por el paso de los vehículos y el medio ambiente. Comúnmente aparecen como una depresión longitudinal con ligero levantamiento lateral de la mezcla asfáltica.

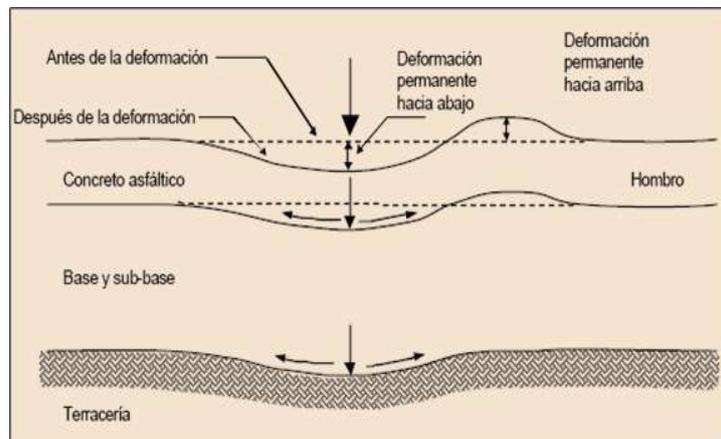
Refiriéndose a las investigaciones del fenómeno de deformación permanente realizada por La AASHTO (American Association of State and Highway Officials) en Estados Unidos, definen como una formación de tipo canal longitudinal o depresión, donde las huellas que se forman en el pavimento están en función de la compresión y del movimiento lateral, o a su vez por su combinación; dichas deformaciones pueden presentarse en una o más capas que forma la estructura del firme flexible debido a la aplicación repetitiva de cargas de tránsito (Garnica et al., 2005a).

La deformación permanente se presenta de dos formas: la que se produce por el cambio de volumen (densificación), que consiste en empujar el pavimento hacia abajo y la deformación plástica por esfuerzos de corte, en cambio, produce que los agregados del material fluyan lateralmente hacia arriba. Es así que este tipo de falla, se define por formar una superficie transversal de un elemento flexible que no se encuentra más en su posición original y cada vez que la carga es aplicada, se incrementa la acumulación de pequeñas deformaciones no recuperables provocando que la depresión en la rodera se torne más profunda (Garnica et al., 2005a).

Para explicar el desnivel producido por la deformación permanente se presenta la figura 12, la cual indica la forma de comportamiento de una estructura flexible y su marcada diferencia de elevación que existe entre la parte superior y la profundidad de la superficie. Así mismo con los esfuerzos generados de tensión en la estructura flexible y el extremo continuo con carga cíclica, existe la posibilidad de producir un deterioro extremo hasta formarse aberturas longitudinales en la capa de rodadura (Morea, 2011).

Figura 12

Mecanismo de deformación permanente en la trayectoria de la rueda externa.



Fuente: Garnica et al. (2005). Características Geomecánicas de Mezclas Asfálticas.

La deformación permanente o ahuellamiento formada por el paso de las ruedas es la forma más común de una deformación permanente en un firme flexible, aunque el origen de la rodera puede suceder por diferentes aspectos como, por ejemplo: el material de la capa inferior debilitada por daño de humedad o debido a la densificación por tránsito. Es por ello que hay que considerar minuciosamente características de los materiales, entornos granulométricos, cantidad de ligante, vacíos en el aire, volumen de los agregados pétreos; que son aspectos dominantes para el desempeño del pavimento flexible a fallas por rodera (Romero et al., 2017).

Algunos investigadores Kandhal et al. (1992), Corona (2017) y Botasso et al. (2017) manifiestan que además de la rigidez del ligante, las propiedades de la estructura granular contribuyen a la rigidez del pavimento, principalmente cuando se utilizan parámetros ideales respecto a las propiedades de forma de la partícula, angularidad y textura aspectos que producen a la mezcla asfáltica una adecuada trabazón entre los agregados. Adicionalmente al recurrir materiales con mayor tamaño máximo y una buena distribución de tamaños inferiores, resisten mejor la concentración de esfuerzos producidos por neumáticos con alta presión de inflado, como también contrarrestan la excesiva densificación de la mezcla, proporcionando un mejor resultado al desempeño del pavimento sobre todo en mezclas densas.

Al analizar las exigencias propuestas por Vila y García (2015) sobre módulos de rigidez, determinó que los valores obtenidos por el equipo NAT inferiores a 3000 MPa se encuentran en un nivel tolerable y que para este tipo de casos es necesario evaluar el comportamiento del pavimento asfáltico a roderas.

Para realizar el procedimiento de exigencias de las HMA bajo la deformación permanente para el Ecuador, utilizaron la prueba de compresión cíclica uniaxial y la sustentación de esta propuesta se fundamenta, en la comparación de resultados obtenidos de los

testigos analizados con la prueba de compresión cíclica uniaxial, que fueron tomados del mismo sitio donde realizaron la medición de los niveles máximos de ahuellamiento (31 puntos críticos), el producto de esta información facilitó como resultado que las deformaciones menores o iguales al 1% presentan ahuellamiento inferiores 12 mm y que corresponden a los máximos permitidos por el MTOP, considerando válida esta investigación para emplearse en el Ecuador debido a que cumple el 96.8% de todos los casos analizados. Por tal razón, el estudio presenta parámetros para controlar las deformaciones permanentes en mezclas asfálticas recién producidas en planta (Vila y García, 2015).

- Para mezclas satisfactorias valores menores a iguales al 1%.
- Para mezclas inadecuadas valores mayores a 1%.

Procedimiento para realizar el ensayo de ahuellamiento por compresión cíclica uniaxial (creep dinámico) en el equipo NAT:

1. Se elaboran briquetas de mezclas producidas en planta a 75 golpes por cara y a temperatura óptima como se describe en el método Marshall.
2. Se ingresan dichos testigos a una cámara a 40 °C por el lapso de por lo menos 2 horas y se mantiene esta temperatura hasta que se termine el ensayo de ahuellamiento.
3. Aplicar a los testigos una magnitud carga de 100 KPa y se mide las deformaciones verticales provocadas por 3600 repeticiones de dicha carga (Vila y García, 2015).

2.6. Susceptibilidad a la humedad

El deterioro debido a la humedad se convierte en una de las complicaciones que tiene mayor incidencia en la funcionalidad de los pavimentos. Este fenómeno ocasiona cambios físicos, químicos y de comportamiento en las HMA, provocando una disminución en la durabilidad, serviciabilidad y sobre todo encarece los costos de mantenimiento, de tal forma que un firme flexible sometido a periodos constantes de lluvia y variaciones de temperatura son propensos a daños prematuros en su estructura flexible y estas situaciones son las que comúnmente se presentan en nuestro medio.

El efecto del agua en las mezclas asfálticas produce cambios químicos tanto en la mineralogía de los agregados, el mastic y los vacíos. Otra característica principal de daños por humedad de los pavimentos es el stripping y que asociado al tráfico no presenta una recuperación elástica efectiva provocando pérdida de adhesividad. La interacción entre agua, ligante y agregado, es una manifestación de daño por peladura de la estructura de un pavimento que se relaciona directamente con la cohesión y adhesión de una HMA, el comportamiento de la falla por adhesión se presenta por la separación perfecta de dos superficies que se encuentran en una interfaz; en cambio, la cohesión ocurre en la parte interna de una de las superficies en la interface (Figuerola y Reyes, 2017) y la pérdida de estas propiedades incide en la reducción del módulo de rigidez dando la formación de agrietamiento, baches en el firme flexible antes de que cumpla el tiempo de vida útil.

La prueba de susceptibilidad a la humedad que se realiza para controlar un pavimento flexible al desprendimiento definido por la norma (FM 1-T 283, 2018) tiene como finalidad,



Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología para la innovación del diseño de mezclas asfálticas en caliente

Para el desarrollo de esta investigación, se ha implementado la tecnología Superpave a Nivel I, con criterios de control adicionales al procedimiento Marshall, con la finalidad de evaluar y corregir características del agregado mineral, estructuras granulares y aspectos volumétricos en diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja y con las correcciones necesarias que se realicen para las dos sistemas de diseño, proponer un modelo de mezcla asfáltica en caliente que cumpla parámetros volumétricos apropiados, un esqueleto granular con tamaño de agregados favorables y para medir el comportamiento de la HMA del escenario propuesto, utilizar una técnica de comprobación con el módulo de rigidez empleado en la especificación Europea (CEN-EN 13108-1, 2008), metodología que aplica el módulo resiliente para calcular el desempeño del pavimento.

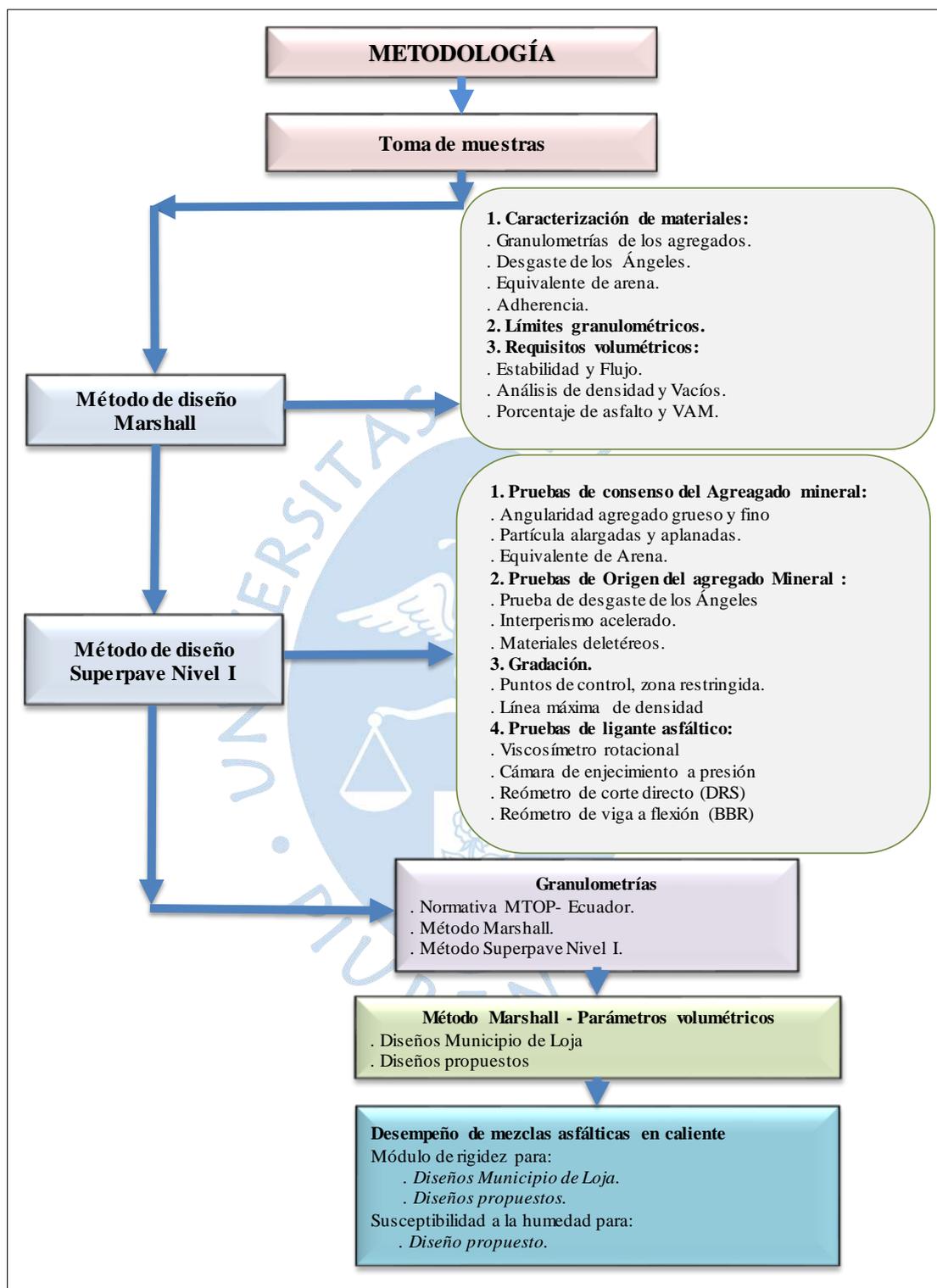
Con toda la información de los escenarios adquiridos tanto para diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja como para los diseños propuestos, comparar los resultados referentes a propiedades volumétricas, granulometrías con el método Marshall y Superpave a Nivel I; y, por último, adquirir el módulo de rigidez para contrastar con las exigencias planteadas por Vila y García (2015), con el propósito de obtener el nivel de comportamiento que se encuentra en cada diseño.

Para proponer un esqueleto granular ideal y que satisfaga las exigencias reales de la zona, debe poseer parámetros volumétricos correctos, una estructura mineral que presente un buen empaquetamiento de sus partículas, un nivel de desempeño satisfactorio bajo el valor del módulo de rigidez y un adecuado al desempeño a la susceptibilidad de la humedad, para ser planteado como una exigencia en los diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja.

En la figura 13, se muestra la metodología a realizar en el presente estudio.

Figura 13

Esquema para la metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Descripción de agregados

Los minerales pétreos proceden de canto rodado, donde se exhiben partículas desde la serie fina hasta tamaños de 5 pulgadas. Luego pasan por un proceso de selección y trituración

con la finalidad de disminuir el diámetro de las partículas a: 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$ pulgadas, arena y filler, para posteriormente ser transportados desde la mina Ramsés hasta el stock en el sector la Tenería – Loja (60 Km.), lugar donde se encuentra la planta de asfalto del Municipio de Ciudad de Loja.

El Municipio de Loja posee tres proveedores de materiales indicados en el capítulo I y para el desarrollo de presente estudio se emplean materiales de la concesión minera Ramsés ya que este tipo de agregado es el más utilizado en diseño de pavimentos flexibles en la ciudad de Loja, la mina se ubica en el Cantón Zamora, Provincia de Zamora Chinchipe.

En la tabla 20 y figura 3, se indica la ubicación de donde provienen los pétreos.

Tabla 20

Coordenadas de mina Ramsés.

Mina	Coordenada ESTE	Coordenada SUR
Ramsés	734900.00 m E	9555700.00 m S

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3

Mapa de ubicación concesión minera Ramsés.



Fuente: Elaboración propia.

3.2.1. Recolección de muestra del agregado mineral

Para obtener la muestra, se recogió agregado mineral de diferentes tamaños del stock de almacenamiento en la ciudad de Loja referente a la especificación (ASTM D75, 2014), tanto para agregado granular grueso como fino, evadiendo adquirir muestras en sitios donde se haya originado segregación de materiales, para lo cual se toma muestras de la parte superior intermedia y baja del stock de agregados y así disponer de una muestra representativa de los pétreos.

Los materiales fueron trasladados en sacos rotulados y sellados correctamente, con la finalidad de evitar su contaminación o confusión en el momento de ser evaluados. En las figuras 14 y 15, se observa la toma de muestras.

Figura 14

Muestra mineral grueso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 15

Muestra mineral fino.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Caracterización de los materiales utilizados

Cuando se requiere elaborar un diseño de pavimento flexible, es obligatorio conocer algunos aspectos tanto físicos, como mecánicos de los agregados, así mismo identificar propiedades del ligante asfáltico. Para lo cual se procede a efectuar varias pruebas aplicando la normativa AASHTO y ASTM, sobre todo con la disponibilidad de equipos de laboratorio

calibrados y en buenas condiciones a fin de disponer de resultados confiables para ser comparados con parámetros de especificación, tanto de la metodología Marshall como del sistema Superpave.

A continuación, se detalla todas las pruebas elaboradas para la caracterización del agregado mineral:

3.3.1. Ensayo de granulometrías de los áridos

El procedimiento para realizar este ensayo es aplicando la Norma (ASTM T 27, 2018) y (ASTM T 11, 2018), que permite determinar el entorno granulométrico de cada uno de los materiales utilizados en la elaboración del diseño de un pavimento flexible. Esta metodología logra identificar los porcentajes de las partículas que se acomodan en todos los tamices para luego ser representados gráficamente en una carta logarítmica.

Los tamaños del agregado mineral para elaborar el ensayo de granulometría son: $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", arena y filler, materiales obtenidos del stock de almacenamiento del Municipio de Loja; previo a la realización del ensayo se procede a lavar cada uno de los tamaños de los áridos, con la finalidad de eliminar materiales arcillosos u otros contaminantes que afecten a la interacción entre el ligante y la estructura granular, hay que notar que va a existir una disminución de finos en los agregados por eliminación de material en el agua.

Los resultados del ensayo sirve para realizar variaciones en porcentajes de cada tamaño granular para la elaboración de esqueletos granulares, con la finalidad de realizar un diseño de pavimento flexible de comportamiento adecuado.

En las figuras 16 y 17, se muestran el proceso de lavado de los agregados y los tamices usados para el ensayo granulométrico de los agregados usados en esta investigación.

Figura 16

Lavado del agregado mineral



Fuente: Elaboración propia.

Figura 17*Ensayo de Granulometría.*

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. *Peso específico de los agregados y Filler*

Como ya se indicó anteriormente, los agregados se someten a un proceso de lavado. Para realizar este ensayo se utiliza la norma (ASTM C127, 2014) en el mineral grueso, en cambio en el mineral fino la normativa (ASTM C128, 2014). Los pasos que se usan en este procedimiento, consisten en determinar la densidad relativa y la absorción del agregado mineral grueso, la densidad relativa se expresa cuando el material es secado al horno (OD), así mismo se obtiene el peso específico aparente en la superficie seca saturada (SSD). La gravedad específica OD se establece luego de secar el mineral, el peso específico aparente SSD y la permeabilidad se evalúan luego de saturar los minerales en el agua para una permanencia específica (Gualpa, 2017). En aquellos materiales que disponga de valores bajos respecto al peso específico, promueven una disminución de la capacidad de absorción incrementando el contenido de asfalto hasta lograr compensar el total del porcentaje que absorbe el agregado.

3.3.3. *Ensayo con azul de metileno*

Para este ensayo se aplica la Norma (AMAAC RA-05, 2010) que consiste en evaluar el grado de respuesta que tienen el agregado fino (tamaño menor al porcentaje de la malla #200) ante la solución del azul de metileno. Al disponer de valores altos superiores a los especificados, en el pavimento flexible puede ocasionar una influencia nociva en su comportamiento provocando deformaciones permanentes antes de su vida útil, como también proveer de mayor susceptibilidad de la mezcla asfáltica al desprendimiento. Hay que indicar que este procedimiento se realiza en dos ocasiones: el primer escenario se hizo sin lavar el agregado fino, donde exhibían valores superiores a los recomendados por la AASHTO; y, luego con el proceso de lavado del material, se obtiene valores a un nivel aceptable. Se aplica la normativa de la AASHTO como referencia para el control de estos parámetros, puesto que la

especificación ecuatoriana dispone de un solo valor máximo para comparar. En la tabla 21, se puede ver requerimientos especificados por la AASHTO.

Tabla 21

Requisitos de azul de metileno, según especificación AASHTO.

Índice de azul de metileno (mg/g)	Comportamiento
menor o igual	6 Excelente
7	12 Aceptable
13	19 Problema de fallas
mayor o igual	20 Falla

Fuente: Delgado et al. (2006). Influencia de la Granulometría en las Propiedades Volumétricas de la Mezcla Asfáltica.

Esta prueba permite obtener el valor de azul de metileno capaz de reaccionar en una muestra de filler hasta su saturación (aparición del aro/círculo) y soportar una cantidad de milímetros de solución adicional hasta la aparición del aro azul. En las figuras 18, 19 se observa el ensayo.

Figura 18

Lavado del agregado mineral.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 19

Azul de metileno - material fino.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Ensayo de adherencia

Este parámetro se define como la afinidad del agregado con el asfalto, es decir se refiere a la capacidad que tiene para mantener envuelto el ligante al agregado aún bajo presencia de agua. Esta propiedad es un fenómeno complejo y es el resultado de interacciones físicas y químicas ente el agregado y el asfalto. El método es rápido, identifica visualmente la pérdida de adherencia en mezclas sueltas de agregado mineral envueltos con ligante.

Para realizar esta prueba se toma referencia a las normativas (ASTM D3625-96, 2001), (I.N.V. E – 757 – 07, 2000) y los valores obtenidos deben ser superiores 95% del recubrimiento, según la especificación local (NEVI-12-MTOP, 2013). En la figura 20 se visualiza el ensayo.

Figura 20

Adherencia asfalto- agregado.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.5. Pruebas de consenso

3.3.5.1. Angularidad del agregado grueso. Este ensayo determina la fracturación del agregado grueso y para realizar este procedimiento se lo hace siguiendo la Norma (ASTM D 5821, 2014), que consiste en obtener el porcentaje una o más caras fracturadas del agregado mineral grueso para tamaños entre $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ pulgada.

Es necesario indicar que el beneficio de las caras fracturadas de una partícula produce un aumento de la resistencia al corte, es decir; el acoplamiento entre sí del agregado mineral al entrar en contacto genera una distribución adecuada de la energía y la angulosidad del mineral producen un acomodo eficiente de las partículas, por tal razón este parámetro es de trascendental relevancia para el comportamiento superficial y estructural al momento de diseñar un pavimento flexible. Otros factores beneficiados en el pavimento son: la macro y micro textura, incremento del módulo de rigidez y resistencia al ahuellamiento. Para la comprobación de valores obtenidos se toma referencia a especificaciones técnicas del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (NEVI-12-MTOP, 2013) para el Ecuador, donde determinan rangos permitidos.

3.3.5.2. Angularidad del agregado fino. Esta metodología se elabora siguiendo la normativa (ASTM C1252, 2020), que consiste en adquirir la cantidad de vacíos debido a exigencias establecidas en una muestra de mineral fino inferiores a 4,75 mm (tamiz N° 4) para un estado suelto. Un contenido alto de vacíos nos indica una elevada angulosidad, inferior cantidad de minerales esféricos y más rugosidad. Cabe mencionar que el valor de angularidad proporciona un índice relevante para la evaluación de fallas por ahuellamiento en un firme flexible, ya que el número de aristas que posee el material fino incrementan el contacto entre partículas favoreciendo el empaquetamiento de todos los tamaños del agregado mineral. Para comprobar los valores se utiliza la normativa ecuatoriana (NEVI-12-MTOP, 2013).

En el procedimiento del ensayo se emplea un tubo estandarizado de 100 cm³, en el cual se ingresa material fino de granulometría dependiendo de los métodos A, B y C hasta completar el agregado en el cilindro. El mineral fino de exceso se retira enrasando el tubo para luego pesarlo, para obtener el valor de la muestra se deduce utilizando el peso del material sin compactar y la gravedad específica neta del mineral. Para la selección de la estructura granular, se utilizan tres métodos: el escenario A, usa muestras con granulometrías específicas con agregado fino que pasa el tamiz # 8 y retenido en el tamiz # 100. El escenario B, determina porciones de tamaños particulares del tamiz # 8 al 16, del tamiz 16 a 30, del tamiz 30 a 50 y del tamiz 50 a 100 y para realizar el cálculo se toma el promedio del contenido de vacíos. El escenario C, es una granulometría obtenida de la muestra tal como se recibe el agregado mineral, usa fracciones de minerales finos que pasan por el tamiz N°4 como se puede ver en la figura 21.

Figura 21*Angularidad del agregado fino.*

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5.3. Equivalente de arena. Esta prueba permite establecer el porcentaje de contaminantes como raíces, arcilla, entre otros que tiene el agregado mineral fino menor a 4,75 mm y para realizar el procedimiento se utiliza la norma (ASTM D2419, 2002). El equivalente de arena es la cantidad de arcillas respecto al porcentaje de arenas en el mineral fino, un material limpio tendrá un equivalente de arena alto (ver figura 22). El valor obtenido de este ensayo se compara con parámetros especificados en la norma ecuatoriana (NEVI-12-MTOP, 2013).

Figura 22*Equivalente de arena.*

Fuente: Elaboración propia.

3.3.5.4. Partículas alargadas y planas. El resultado este ensayo permite establecer la cantidad de partículas planas y alargadas o viceversa del mineral grueso con tamaños mayores a 4,75 mm. Este procedimiento es un medio para evaluar la forma del agregado y se realiza bajo la Norma (ASTM D4791, 2019). En la presente investigación se realiza el ensayo para tamaños de $\frac{3}{4}$ " y $\frac{1}{2}$ " y se utiliza un dispositivo llamado Caliper proporcional, con aberturas calibradas

considerado en la especificación del Ministerio de Transportes y Obras Públicas del Ecuador (NEVI-12-MTOP, 2013).

3.3.6. Pruebas de origen

3.3.6.1. Degaste de abrasión Los Ángeles. La norma que se utiliza para realizar el ensayo es AASHTO T 96 (2015), este método sirve para valorar la resistencia a la degradación del agregado por medio de la abrasión en la máquina de Los Ángeles. El efecto que produce es disminuir las partículas en tamaño más pequeños de 37,5 mm al interactuar en el equipo de abrasión de Los Ángeles un juego de esferas de acero con el agregado grueso (Figura 23); el impacto en conjunto también nos ofrece valores de resistencia del agregado al aplastamiento, ya que el firme flexible frecuentemente está expuesto a la presencia de cargas, simulando el resultado de impacto de las partículas. En el MTOP para el Ecuador (NEVI-12-MTOP, 2013), se especifican valores tolerables.

Figura 23

Máquina de abrasión de Los Ángeles.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.6.2. Interperismo acelerado. La metodología determina la susceptibilidad del mineral al interperismo como el agua, hielo y variación de temperatura, así mismo predice alteraciones que pueda soportar el agregado mineral al encontrarse en condiciones ambientales extremas dentro del periodo de vida útil de la estructura flexible. Para realizar este ensayo se utiliza la Norma AASTHO T 104 (2010), ver figura 24.

El procedimiento consiste en utilizar una solución saturada de sulfato de sodio y su comportamiento dependerá de la resistencia a la que se oponga luego de que se deshidrate total o parcialmente la sal que se encuentra en el mineral luego de estar en el horno, dicha muestra será sometida a cinco ciclos de prueba de durabilidad y el desgaste determinado no será superior a lo que especifica en el MTOP para el Ecuador (NEVI-12-MTOP, 2013).

Figura 24*Sulfato de Sodio.*

Fuente: Elaboración propia.

3.3.6.3. Materiales deletéreos. Esta prueba permite encontrar la cantidad aproximada de terrones con arcillas u otras partículas contaminantes que se encuentran en la estructura granular. El desarrollo de este método se lo hace bajo la especificación ASTM C 142 (2014) o AASHTO T 11, es una propiedad que evalúa la interacción entre el esqueleto granular y cementante, cuando se incumple esta especificación puede ocasionar desprendimiento del agregado en la mezcla sobre todo cuando existe la presencia de agua. El comportamiento común que presentan los pavimentos flexibles al poseer en su agregado mineral arcillas, es el debilitamiento del cementante hasta ocasionar disgregación total del pavimento.

El agregado mineral que no cumplen con la especificación (deletéreos) imposibilitan el recubrimiento del ligante asfáltico al esqueleto granular, puesto que dichas partículas que no pertenecen a la parte mineral, se convierten en agentes perjudiciales para un buen desempeño de las HMA. Algunos ejemplos de contaminantes, que por lo general se encuentran en la mezcla asfáltica son: arcillas, grasas, aceites, raíces, vegetación, vidrios, etc.

3.4. Pruebas habituales de clasificación para ligantes asfálticos

El color que posee es negro, este producto varía considerablemente de acuerdo a su consistencia ya sea sólido o semisólido dependiendo de las temperaturas a la que esté sometido y debe ser calentado lo necesario para ser utilizado en una mezcla asfáltica, en general se presenta con propiedades visco – elásticas. Esta componente asfáltica al aplicarle incrementos de temperatura se ablanda hasta convertirse en un fluido de tal forma que logra envolver el esqueleto granular al momento de la elaboración de la HMA (Asphalt Institute MS-22). Así mismo, es considerado como material bituminoso porque posee propiedades adhesivas y aglomerantes que permite dimensionar el comportamiento reológico, características tecnológicas que son necesarias para la elaboración de las HMA. (Figura 25).

Figura 25*Cemento asfáltico.*

Fuente: Zúñiga et al. (2013). Certificación Vial Grado I

Para realizar esta investigación se utiliza un ligante producido en la refinería de petróleo, ubicada en ciudad de Esmeraldas (Ecuador) y para determinar la calidad mediante pruebas convencionales, se toma como referencia la tesis desarrollada por (León et al., 2017) ya que esta información se encuentra actualizada y los equipos en los cuales realizaron los ensayos cumplen con los procedimientos descritos tanto para las normas locales (INEN 2515, 2010), como también para las especificaciones internacionales (ASTM D 3381-92, 1999). Los ensayos convencionales de clasificación por viscosidad que utilizaron para evaluar el ligante se detallan a continuación.

3.4.1. Viscosidad

Esta propiedad provee la resistencia del cementante a fluir, proporcionando datos de comportamiento a elevadas temperaturas (Ray & Cols, 2009). La prueba es efectuada a 60 °C y 135 °C, para el caso de temperatura a 60 °C se refiere al desempeño de un día a temperaturas extremadamente grades y para la temperatura de 135 °C, en cambio representa la fluidez del ligante en el momento que es extraído de la refinería para el transporte y almacenamiento en las plantas de asfalto (León y Villao, 2017).

Para determina el ensayo de viscosidad a 60 °C, utilizaron la norma actualizada ASTM D-4402, procedimiento que consiste en evaluar una muestra de $10 \pm 0,50$ gramos de ligante en un recipiente y ensayar en el equipo viscosímetro Brookfield (ver figura 26).

Figura 26

Prueba en el Viscosímetro Brookfield a 60 °C.



Fuente: León y Villao (2017). Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

Cuando hay valores de viscosidad inferiores al rango expresado en la normativa del ensayo a 60°C el comportamiento de cemento asfáltico se torna rígido, que produce en las mezclas asfálticas problemas de fatiga hasta convertirse en grietas; en cambio cuando adquiere valores superiores al parámetro establecido, el firme flexible es propenso a problemas de ahuellamiento por tener características elasto-plástica.

3.4.2. Penetración

En la realización de este método usaron como referencia la norma ASTM D-5, que consiste en un ensayo empírico y permite obtener la consistencia del asfalto a 25 °C temperatura promedio de servicio controlada termostáticamente con un baño María. Este valor también nos ofrece otro indicativo para identificar si el asfalto es elástico o rígido y comparar el comportamiento del ligante a problemas de ahuellamiento y fatiga respectivamente. Para el procedimiento del ensayo de penetración del ligante, es dejar descender tres veces seguidas una aguja con un peso de 100 gr desde la parte superior a una muestra por cinco segundos, el resultado será en medir la profundidad en décimas de milímetro (León y Villao, 2017).

3.4.3. Punto de ablandamiento

Este procedimiento evalúa la temperatura en la cual el cemento asfáltico inicia a fluir, por tal razón, es importante conocer este parámetro porque permite determinar la temperatura en la que el asfalto se ubica de un estado semisólido a líquido, que varía dependiendo del material. Para realizar este ensayo usaron la norma AASHTO T53 (2001), ver figura 27.

Figura 27*Ensayo punto de ablandamiento.*

Fuente: León & Villao (2017). Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

3.4.4. Envejecimiento al horno (RTFOT)

Permite evaluar la vulnerabilidad al envejecimiento del cemento asfáltico en el instante que se realiza la mezcla asfáltica e incluye componentes ambientales que influyen en el comportamiento en el tiempo, los valores que ofrece este ensayo permiten obtener el aumento o disminución de peso respecto al peso inicial antes de calentar (León y Villao, 2017). En general, el envejecimiento del ligante a corto plazo es una simulación cuando se realiza la fabricación del pavimento flexible a altas temperaturas o también se manifiesta en el momento en que se produce el transporte y tendido en campo (S. Shuler et al., 1994).

Para la descripción del ensayo tomaron como guía la Normativa ASTM D 2872 (2004). Los pasos a seguir: es vaciar ligante asfáltico en botellas para luego someterlo a rotación en un horno a 163 °C dejando ingresar aire con temperatura en una abertura del molde para todas las muestras. La función principal de la prueba es producir un ligante asfáltico (León y Villao, 2017) envejecido con la finalidad de efectuar otros ensayos como son: viscosidad, prueba en los equipos DSR y PAV que posteriormente se estará detallando.

3.4.5. Ductilidad

Consiste en medir la capacidad que posee un ligante para alargarse hasta que suceda la ruptura. El ligante con elevado grado de ductilidad tienen amplia capacidad para resistir ahuellamientos que comúnmente son provocadas por las cargas de tránsito. Esta propiedad es relevante indicar ya que es vulnerable a incrementos de temperaturas y puede hacer variar su consistencia (León y Villao, 2017).

En este procedimiento de ensayo usaron la norma ASTM D 113-07 (2002), esta metodología permite cuantificar la resistencia de rotura en el cementante debido al estiramiento del mismo a una velocidad uniforme de 5 cm por el lapso de un 1 min, cuando los testigos se hallan acondicionados en agua dentro del ductilímetro a una temperatura de 25 °C (León y Villao, 2017).

3.5. Valores de clasificación por viscosidad

Como ya se indicó en el apartado anterior, los valores son extraídos de la caracterización reológica avanzada del ligante asfáltico empleado en el Ecuador (León y Villao, 2017). En la Tabla 22, se encuentra el resultado de los ensayos y la comparación entre la normativa ecuatoriana (INEN 2515, 2010) e internacional (ASTM D 3381-92, 1999).

Tabla 22

Resultados de clasificación por viscosidad del asfalto usado en la presente investigación.

PROPIEDADES	Unidad	INEN 2515 ENMIENDA 1		ASTM D3381 92		VALORES ASFALTO ECUADOR
		AC 20	AC 30	AC 20	AC 30	
Penetración (25°C) 100 g 5s	0,1 mm	Min 60	Min 50	Min 60	Min 50	65
Punto de ablandamiento °C	° C	48- 57		47 - 58		50
Índice de penetración	-	-1,5 a 1.5	-1,5 a 1.5			-0.6
Gravedad Específ. 25 °C/25 °C	g/cm ³	1.00				1,0360
Flash point, copa Cleveland	° C	232 mín.	232 mín.	232 mín.	232 mín.	295
Viscosidad dinámica (60 °C)	Pa.s.	160-240	240-360	160-240	240-360	256
Viscosidad cinemática (135 °C)	Pa.s.	300 mín.	350 mín.	300 mín.	350 mín.	347.5
RTFOT. 5 hrs. a 163 °C						
Viscosidad dinámica (60 °C)	Pa.s.	800 máx.	1200 máx.	1000 máx.	1500 máx.	1220
Cambio de masa (%)	% w/w	1 máx.	1 máx.	1 máx.	1 máx.	-0.02
Ductilidad (25 °C)	cm	50 mín.	40 mín.	50 mín.	40 mín.	38

Fuente: León y Villao (2017). Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos del ligante elaborado en la refinería de petróleo en Esmeraldas respecto a la normativa ecuatoriana y ASTM, se hace notar que el asfalto clasifica como AC-30 principalmente al tomar como referencia la propiedad de viscosidad dinámica a 60 °C. Otra característica que no cumple con parámetros referentes a las dos especificaciones es el ensayo de ductilidad, que se obtiene del proceso de envejecimiento primario (RTFOT). Esto significa que el ligante es propenso a sufrir un elevado endurecimiento en el proceso de oxidación lo que hace que pierda propiedades de adhesión y la respuesta a esfuerzos de tracción en especial en el transcurso de mezclado, transporte y compactación del pavimento flexible. Lo mismo sucede con valores de viscosidad dinámica luego del

envejecimiento (RTFOT) no cumple para la normativa ecuatoriana, pero lo hace para las exigencias en la especificación ASTM, lo que ratificaría que el ligante no se comporta como AC-20 y es propenso a convertirse en un cementante muy rígido a temperaturas mínimas de servicio, provocando fisuras por incrementos considerables de temperatura de grades a pequeñas (fallas por bloque) a temprana edad (León y Villao, 2017).

3.6. Ensayos de clasificación por desempeño según método Superpave

El sistema Superpave fue desarrollado en U.S.A. entre octubre del 1987 y marzo del 1993, donde incluyen nuevas especificaciones para cementos asfálticos y agregado mineral. En lo que respecta al ligante, determinar el grado de desempeño y formula dos aspectos fundamentales: primeramente, cuantifica las propiedades físicas del cemento asfáltico y evalúa el desempeño referente a fallas como: deformaciones permanentes, deterioro por fatiga, deterioro térmico y como último aspecto, mide las propiedades para temperaturas intermedias, como también evaluar el ligante envejecido, que representa el comportamiento en la construcción y en el tiempo de servicio del pavimento.

El procedimiento del sistema Superpave a nivel I se fundamenta inicialmente en obtener incrementos de temperaturas ambientales (altas y bajas) medidas a 20 mm de la capa de rodadura de la estructura flexible durante siete días continuos más calurosos del año con el propósito de establecer el grado de desempeño (PG) del sector donde se va a colocar el firme flexible. Con esta implementación tecnológica termina innovando el sistema de especificaciones de los ligantes con los ensayos adicionales a la clasificación por el grado de viscosidad.

Para obtener los resultados de los ensayos mediante la clasificación Superpave, se utiliza información de la investigación realizada por León y Villao (2017), puesto que es el mismo ligante utilizado en este experimento y en la ciudad de Loja no se dispone de equipos para el control del asfalto bajo el sistema Superpave. A continuación, se describen los ensayos.

3.6.1. Cámara de envejecimiento a presión (PAV)

Esta prueba corresponde a otra etapa del envejecimiento, se ejecuta después de ser ensayado al horno (RTFOT) y representa una simulación del envejecimiento que sufrirá el asfalto luego de algunos años de servicio.

El procedimiento lo realizaron siguiendo la norma ASTM D 6521 (2000) ver figura 28, que se determina al someter un testigo de 50 gramos de ligante después de haber estado en el horno (RTFOT), seguidamente se expone el cementante al horno a un intervalo de temperatura de 90-100 °C dependiendo del clima en el cual sea utilizado; por último, aplicando una presión (1 MPa) dentro de la cámara del PAV por el lapso de veinte horas, el testigo simula una comparación en condiciones de servicio de 7 a 10 años que posteriormente se comprueba con el ensayo de DSR (León y Villao, 2017).

Figura 28

Cámara de envejecimiento de asfalto PAV.



Fuente: León y Villao (2017). Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

3.6.2. Reómetro de corte directo (DRS)

Esta caracterización reológica del asfalto, permite determinar el módulo de corte complejo (G^*) y ángulo de fase (δ) del ligante asfáltico a elevadas temperaturas, donde al aplicar movimientos oscilatorios con ciclos de frecuencia de 10 rad/seg a una cantidad de material bituminoso, equivale a una velocidad de tránsito igual a 90 km/h.

Para elaborar el procedimiento del ensayo emplearon la norma AASTHO T 315-12 (2001), que consiste en utilizar una muestra de ligante, para luego ser colocada en un molde de silicón y someterla a compactación en platillos paralelos de diámetro 25 mm, con un espesor 1 mm; existen otras medidas dependiendo del origen del ligante (PAV, RTFOT). Por último, la muestra en el platillo es expuesta a frecuencias y amplitudes en deformaciones controladas para determinar su valor (Figura 29).

Figura 29*Reómetro de corte directo.*

Fuente: León & Villao (2017) Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

Como se ha indicado anteriormente la tecnología Superpave, evalúa el tipo de falla del pavimento y este ensayo caracteriza primeramente el ahuellamiento a elevadas temperaturas de servicio promovidas por el constante movimiento de cargas de vehículos, que inducen al incremento de las deformaciones de tipo plástico en el firme flexible, y para mitigar este efecto hay que controlar limitando el factor $G^*/\sin\delta$ (medida de rigidez) a 1 kPa (antes de envejecimiento) y a 2,2 kPa (luego del envejecimiento RTFO) a la temperatura del ensayo. En cambio, para describir el deterioro por fatiga, se controla limitando el valor $G^*\sin\delta$ del material envejecido a presión (PAV) a un máximo de 5000 kPa a la temperatura de la prueba (grupo SHRP); esta falla por lo general se produce al terminar la vida útil del firme flexible (León y Villao, 2017).

Otro aspecto que influye considerablemente para el desempeño de fallas por fatiga y deformación plástica del pavimento son las características del agregado mineral ya que éste posee alrededor del 94% de la composición de mezcla asfáltica, indicados en el apartado anterior.

3.6.3. Reómetro de viga a flexión (BBR)

El ensayo cuantifica la rigidez (stiffness) del ligante a mínimas temperaturas. Es decir, esta metodología se fundamenta en el comportamiento de vigas, que se basa en ejercer una carga de creep sobre una viga pequeña simplemente apoyada para representar los esfuerzos que sucesivamente se generan en una estructura flexible al disminuir la temperatura (Figura 30). Hay dos resultados que se obtienen del BBR: indicador de resistencia a una carga constante y el valor m determina la variación de la rigidez del ligante al ejercer las cargas.

Para elaborar el procedimiento de prueba utilizaron la norma AASHTO T 313-12 (2016), que consiste en vaciar el cementante en un molde (aluminio) prismático rectangular cubriendo todos los espacios vacíos y esquinas hasta formar una viga uniforme, se deja enfriar de 45 a 60 minutos para luego colocar en el congelador por el lapso de 10 minutos y finalmente se extrae del molde para someter la lámina a carga en el equipo BBR.

Figura 30

Reómetro de viga a flexión.



Fuente: León y Villao (2017). Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.

El resultado de este ensayo se relaciona con la falla por agrietamiento térmico, que se expresa con la aparición grietas transversales en la superficie de rodadura. La rigidez obtenida a temperaturas muy bajas debe estar sujeta bajo condiciones de creep y no debe ser superior a 300 MPa, el valor de la pendiente de la curva $S(t)$ vs tiempo a los 60 segundos (m) debe ser mayor de 0,3 (León y Villao, 2017) como se indica en las Tablas 14 y 15 para las especificaciones Superpave.

3.7. Valores de las pruebas para la clasificación por desempeño del ligante en Ecuador

En la Tabla 23, se presentan los resultados de la caracterización del asfalto por grado de desempeño del sistema Superpave para un cementante producido en Ecuador dicha información fue tomada de la tesis realizada por León y Villao (2017), que representa al comportamiento del ligante utilizado en la presente investigación.

Tabla 23

Caracterización por grado de desempeño PG del ligante para Ecuador método Superpave.

PROPIEDADES	TEMP.	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	VALORES
LIGANTE ORIGINAL				
Punt. de Inflamación (°C.)		AASHTO T 48	230 min	295,00
Viscosidad (Pa.s)	135 °C	AASHTO T 316	3,0 máx.	347,50
	46 °C			18,60
	52 °C			7,86
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	58 °C	AASHTO T 315	1,0 min	3,34
	64 °C			1,47
	70 °C			0,66
RESIDUO RTFOT (163°C, 85 min)				
Pérdida de Masa (%)		AASHTO T 240	1,0 máx.	-0,02
	46 °C			58,70
	52 °C			25,80
	58 °C			11,00
Módulo de Corte Dinámico (G*/sinδ, 10 rad/seg), kPa	64 °C	AASHTO T 315	2,2 min	4,87
	70 °C			2,20
	76 °C			1,16
RESIDUO ENVEJECIDO PAV (100°C, 300 psi, 20 hr)				
Módulo de Corte Dinámico (G* x sinδ, 10 rad/seg), kPa	31 °C			708,00
	28 °C			1020,00
	25 °C			1480,00
	22 °C	AASHTO T 315	5000 máx.	2160,00
	19 °C			3060,00
	16 °C			4230,00
	13 °C			5800,00
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-30 °C		300 máx.	728,00
Valor m			0,300 min	0,199
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-24 °C	AASHTO T 315	300 máx.	457,00
			0,300min	0,262
Rigidez al desplazamiento, MPa (60 sec)	-18 °C		300 máx.	240,00
			0,300min	0,317

Fuente: León et al. (2017). Caracterización Reológica de Asfaltos empleados en Ecuador.

Como se puede ver los valores en la Tabla 22, la clasificación por grado de desempeño del cemento asfáltico producido en Ecuador es PG 64-28. Otra característica analizada es la

clasificación por viscosidad, donde indica que el ligante ecuatoriano presenta un mayor endurecimiento, es decir el asfalto se torna más rígido al momento de someterlo a temperaturas elevadas para el proceso de mezclado entre el cementante y agregado mineral.

En la investigación realizada por Vintimilla (2014) elaboró una zonificación de temperaturas altas y bajas del (PG) en las tres regiones de Ecuador y el resultado de esta información se ve sustentado por la recolección de datos respecto a los anuarios emitidos por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), selección de estaciones climatológicas, comparación con mapas de isotermas del país; así como también, el procesamiento de información y ajustes que lograron determinar los resultados que se muestran a continuación:

- Región Costa PG 58-16.
- Región Sierra PG 46-34 y
- Región Amazonía PG 52-10.

Haciendo una comparación entre la clasificación del PG: 64 - 28 del ligante asfáltico con todas las tres regiones del país, cumple para casi todas excepto la región Sierra, donde puede existir problemas de agrietamiento por fatiga (temperaturas intermedias), como a temperaturas bajas.

En otro estudio realizado en el Ecuador por Vila et al. (2017) referente al comportamiento del ligante asfáltico frente al agrietamiento por fatiga (temperaturas intermedias) determinaron que la temperatura crítica para el PG: 64-28 es de 16 °C y este valor representa a la temperatura donde alcanza un $G^*_{sen\delta}$ menor o igual a 5000 kPa realizado por el equipo de reómetro de corte directo luego del RTFO, PAV. Eso significa, que para temperaturas de pavimentos menores o iguales a 16°C. no sufren problemas de agrietamiento por fatiga para regiones de la costa y la Amazonía, pero este criterio no se cumple para la región Sierra donde existe temperaturas bajas y un alto tráfico de vehículos pesados, que es precisamente donde se desarrollan fisuras en bloque, desprendimientos o peladuras en los pavimentos asfálticos.

3.8. Descripción del diseño de mezcla

Se detalla el desarrollo y procedimientos para proponer un diseño de mezcla asfáltica a nivel tolerable o satisfactorio aplicando nuevas herramientas para su desempeño, tomando como base lo siguiente:

- Selección de granulometrías (varias estructuras granulares).
- Dosificación de las mezclas de agregados para preparación de las probetas.
- Elección del porcentaje de vacíos.
- Características de las mezclas.

3.8.1. Selección de granulometrías

Para la elaboración de los diseños tentativos de estructuras flexibles se procedió a seleccionar 5 tipos de agregados ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", arena y filler) del stock de acopio de materiales de la planta de Municipio de Loja (sector La Tenería) provenientes de canto rodado triturado. Previo a la preparación de la muestra se realizó ensayos tanto de materiales gruesos como finos y los que no cumplieran con especificaciones establecidas tanto para el método Marshall como sistema Superpave a Nivel I, se corrigieron oportunamente mediante el lavado del agregado fino y grueso, puesto que al realizar los ensayos: angularidad de agregado fino, Azul de metileno y Deletéreos, se obtuvieron valores insuficientes para cumplir especificaciones de control de las tecnologías antes mencionados, y en éste proceso se detecta la presencia de arcillas, raíces y materiales contaminantes. Así mismo en lo que respecta al ensayo de angularidad de agregado grueso, se corrigió el porcentaje de dos caras fracturas con la selección del material para que cumpla esta característica.

Con la muestra corregida, se establecen tres entornos granulométricos; y, para el escogimiento de estas estructuras granulares, se realiza en base a revisión bibliográfica y por publicaciones científicas de algunos investigadores como:

Brown y Pell (1974) concluyeron que las mezclas abiertas o de graduaciones de tipo discontinuas exhiben mayores deformaciones plásticas y son más vulnerables a las roderas a temperaturas altas, que las mezclas densas o elaboradas con granulometrías continuas (Delgado et al., 2006).

Kandhal & Mallick (2001) afirman que las estructuras granulares gruesas abajo la zona restringida y graduaciones finas por arriba de la zona restringida presentan el mismo comportamiento a deformaciones permanentes, pero granulometrías bajo la zona restringida ofrecen un peor comportamiento a fatiga.

En cambio, Delgado et al. (2006) describe que las granulometrías que atraviesan por la zona restringida muestran un mejor desempeño en los pavimentos flexibles.

En otra investigación por Botasso et al. (2017) y Corona (2017) indica que la presencia de áridos gruesos (bajo la zona restringida) mejora el desempeño por ahuellamiento y altos módulos de rigidez respectivamente, en las HMA.

Con la literatura anteriormente analizada, se toma como primera estructura de agregado, la graduación que pasa dentro de la zona restringida bajo la línea de máxima densidad y termina dentro de los puntos de control (Diseño A). Luego está la granulometría del sistema Superpave donde la gráfica cumple estrictamente el criterio de evitar la zona restringida, ubicándose por la parte baja e ingresa dentro de los puntos de control (Diseño B). Por último, se encuentra la estructura de agregado que cruza la zona de restricción y termina sobre la línea de máxima densidad (Diseño C).

Para el desarrollo del experimento se focaliza en la implementación del entorno granulométrico del sistema Superpave a nivel I como una parte de innovación en los esqueletos granulares para el diseño de pavimentos flexibles. Pero al revisar información sobre el

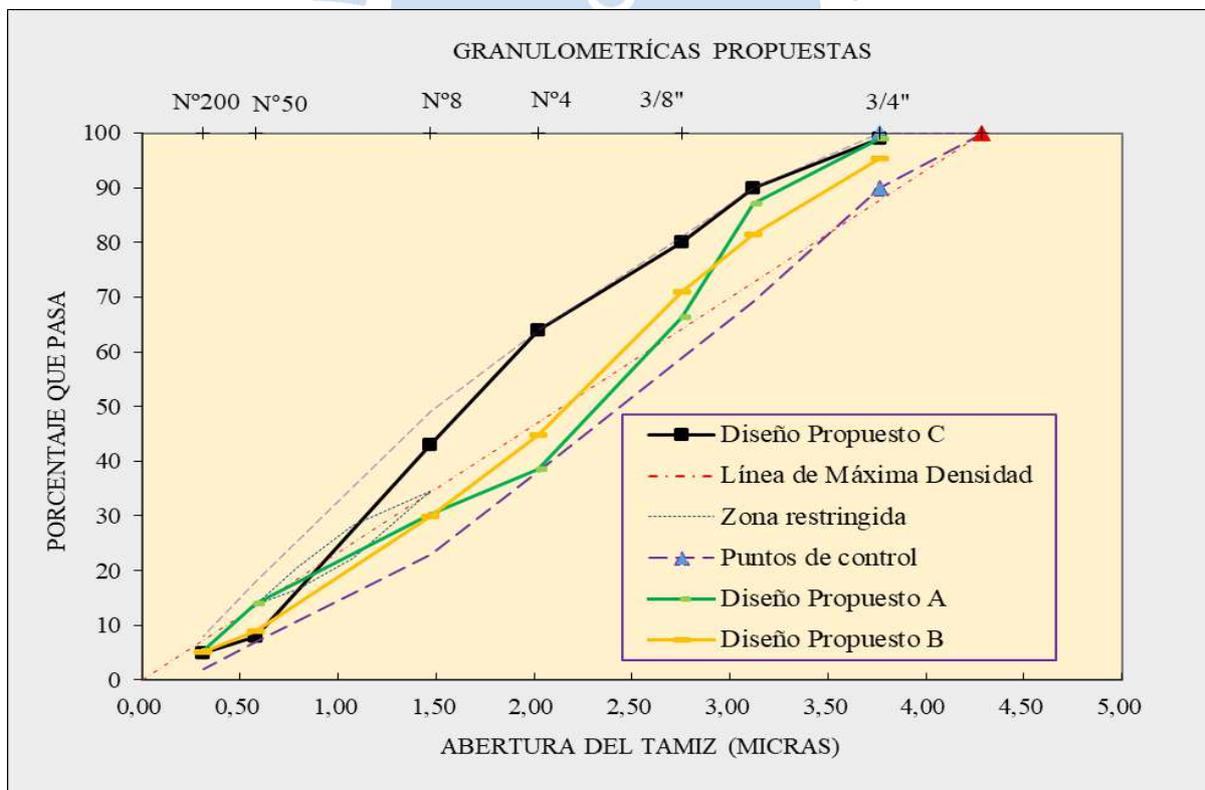
desempeño de esqueletos granulares en las HMA se constata que se puede utilizar graduaciones de diferente tipo, donde la faja granulométrica puede encontrarse entrecruzada, dentro, sobre o bajo la zona restringida y por cada uno de estos criterios se puede obtener un buen comportamiento del firme flexible a fallas como deformación permanente y fatiga. Por tal motivo, se elige, tres esqueletos granulares que integren los criterios antes indicados con el propósito de evaluar el desempeño de las propiedades de las HMA con la metodología Marshall y Superpave para compararlos con el comportamiento del módulo de rigidez obtenido del equipo NAT y proponer un diseño que equilibre los deterioros antes indicados.

Adicionalmente, se toma en consideración el entorno granulométrico emitido por Ministerio de Transporte y Obras Públicas (NEVI-12-MTOP, 2013) como también información de la Guía para la Selección de Mezclas Asfálticas en Caliente para Pavimentos (Tabla 8), donde dispone de valores en porcentaje de cada tamaño para diferenciar graduación densa gruesa y densa fina.

Como se puede apreciar en la figura 31, los diseños propuestos fueron elaborados para un tamaño nominal de 19,0 mm descrito por la normativa ecuatoriana, que consta un tamaño intermedio de 2,36 mm, tamaño de polvo de piedra menor de 0,075 mm y finalmente una zona restringida de tamaños 2,36 mm y 0,30 mm.

Figura 31.

Graduaciones para diseños propuestos A, B, C.



Fuente: Elaboración propia.

3.8.2. Dosificación de las mezclas de agregados para preparación de las probetas

Para la elaboración de la mezcla, se procede con el cribado de 7 tamices diferentes con la finalidad de establecer la dosificación correcta de acuerdo a los porcentajes establecidos para cada uno de los diseños determinados, las tres graduaciones por evaluar, comprenden desde la malla $\frac{3}{4}$ " a la malla N°200 y el procedimiento para preparar un diseño de estructura flexible se realiza con la metodología Marshall que se explica a continuación:

- Preparar en peso cada una de las cantidades de materiales de los diferentes tamaños de agregados, ver figura 32.

Figura 32

Preparación de muestras.



Fuente: Elaboración propia.

- Calentar el agregado con peso exacto y porcentajes de asfalto (4.5, 5, 5.5, 6, 6.5) a temperatura de 145 °C. y mezclar hasta que se encuentre homogénea la muestra, observar figura 33.

Figura 33

Interacción ligante agregado.



Fuente: Elaboración propia.

- Someter el pavimento a prueba de envejecimiento al horno de plazo corto, similar al procedimiento que maneja la tecnología Superpave, en la cual envejece la mezcla colocándola en el horno a 135 °C durante cuatro horas antes de fabricar los testigos, pero este tiempo se reduce a una hora porque es lo que tarda en preparar, transportar y colocar el pavimento flexible en diferentes sitios de la ciudad de Loja. Ver figura 34.

Figura 34

Temperatura después del envejecimiento al horno.



Fuente: Elaboración propia.

- Luego de estar 1 hora en el horno a 135 °C se elaboran los especímenes compactados en tres capas y cada capa con 75 golpes por cara, con la mezcla en exceso se adquiere el peso específico máximo medio (RICE), ver figuras 35 y 36.

Figura 35

Procedimiento de compactación con el martillo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36

Testigos para prueba equipo Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

- Se obtiene el peso específico Bulk del testigo, como también se adquiere valores de estabilidad y flujo del equipo Marshall, ver figuras 37 y 38, respectivamente.

Figura 37

Peso específico Bulk.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38

Equipo Marshall.



Fuente: Elaboración propia.

- Por último, se elaboran briquetas con la estructura granular definida y contenido de asfalto óptimo, para probar tanto con el equipo Marshall - NAT y obtener valores de flujo, estabilidad y módulos de rigidez, ver figura 39. Esta metodología se realiza para cada diseño escogido y para el procedimiento se toma de la AASHTO T-245 (2012) y ASTM D-1559 (1989).

Figura 39*Testigos para equipo Marshall-NAT.*

Fuente: Elaboración propia.

3.8.3. Elección del porcentaje de vacíos

Para la selección de este parámetro es importante disponer de toda la información de la mezcla como es: peso específico máximo medio (RICE), peso específico Bulk de cada testigo, así mismos valores de estabilidad (cohesión) y flujo (fricción), datos que permiten realizar las gráficas para cada uno de los parámetros volumétricos del pavimento flexible. La elección del valor del porcentaje de vacíos es importante, pues valores menores a 3% posee baja cantidad de asfalto y es susceptible a segregación, en cambio valores superiores a 8% expone la capa asfáltica a deterioros prematuros por deformación permanente; con los criterios antes mencionados y la especificación de la tabla 2 se asume el valor de 4% para obtener las características volumétricas de todos los diseños propuestos. Así mismo algunos autores como Garnica et al. (2004), Garnica et al. (2005), Romero et al. (2017) recomiendan usar un intervalo de porcentaje de vacíos entre 3-5%, ya que parámetros fuera de este rango imposibilita que el ligante llene los vacíos del aire entre los espacios del esqueleto granular, como también produce huellas en el firme flexible por la excesiva consolidación cuando estén expuesto al tráfico vehicular.

3.9. Susceptibilidad a la humedad

Para realizar esta prueba, principalmente contrasta valores de resistencia a la tensión indirecta (método Lottman modificado) de un espécimen en condición seca y de un testigo expuesto al agua. Los testigos en agua se someten a saturación por vacío, seguido por un periodo de congelamiento y humedecimiento en agua, los valores de este método se consiguen como la relación que existe entre: resistencia de tensión de testigo en condición seca y resistencia de tensión del testigo con el ciclo de saturación.

El acondicionamiento de las probetas para obtener el porcentaje de tensión indirecta (TSR), se realiza para el diseño C, con el propósito de determinar el comportamiento a la susceptibilidad de la humedad, ya que este modelo de diseño de mezcla asfáltica presenta un nivel de desempeño satisfactorio bajo el valor del módulo de rigidez.

3.10. Módulos de rigidez - Equipo NAT

Para realizar este ensayo se elaboran dos testigos adicionales a los obtenidos para comprobar el diseño por el equipo Marshall (flujo - estabilidad), tanto para las mezclas asfálticas recién producidas en planta por el Municipio de Loja, como también para los nuevos diseños propuesto. El procedimiento utilizado para la fabricación del diseño de las HMA es la metodología Marshall y para obtener las briquetas de análisis en el equipo NAT se induce un envejecimiento al horno de corto plazo el mismo que usa la tecnología Superpave, que consiste en envejecer la mezcla al introducirla en el horno a 135 °C por cuatro horas, antes de elaborar los testigos este tiempo puede reducirse a una hora, de tal forma que simule el procedimiento de transporte y colocación en campo (Vila y García, 2015). En la presente investigación se envejece la muestra en el horno a 135 °C por el lapso de una hora, ya que es el tiempo máximo que tarda la mezcla en ser transportada desde la planta hasta el sitio de obra y luego de su elaboración se hace llegar los testigos al laboratorio de la Universidad Católica de Guayaquil para valorar el comportamiento de las mezclas respecto al módulo de rigidez, puesto que en la ciudad de Loja no se dispone del equipo para realizar este ensayo (ver figura 40).

Figura 40

Pruebas de briquetas equipo NAT.



Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4

Desempeño del diseño de mezcla asfáltica

4.1. Comportamiento del agregado mineral

Como ya existe conocimiento sobre criterios para seleccionar la calidad de materiales pétreos en la fabricación de las HMA, las componentes minerales que integran el firme flexible son determinantes para el desempeño del pavimento dentro de la vida útil debido a que el pétreo establece en las HMA entre el 90 y 95 % de su peso. Por tal razón, al seleccionar el material pétreo debe estar acorde a las especificaciones técnicas que proporcionen en gran medida resistencia: al ahuellamiento, fisuramiento debido a fatiga, desgarramiento superficial y a la pérdida de resistencia por el ensayo de acondicionamiento en agua, fallas que comúnmente se presentan en las carpetas de mezclas asfálticas.

El material mineral utilizado para la fabricación de las mezclas proveniente de canto rodado y fueron sometidos a procesos de trituración para obtener tamaños adecuados ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", arena y Filler), los cuales se obtuvieron del muestreo de acopio en banco de materiales ubicado en la planta de asfalto del Municipio de Loja en Ecuador.

Para hacer un análisis de las características del agregado mineral utilizado en la investigación, se elabora la tabla 24, donde se indican los resultados de las pruebas que admiten definir el desempeño de los agregados en las HMA bajo la metodología Marshall y Superpave a Nivel I. Así mismo permite identificar anomalías en la estructura granular que puedan afectar al deterioro del firme flexible en las mezclas elaboradas en la ciudad de Loja y por otro lado corregir el aspecto granular para la fabricación de los nuevos diseños.

Tabla 24*Caracterización de los agregados.*

Ensayo	Unidades	Norma	Límites MTOP	Límites Superpav e	Resultado	Observaciones
Azul de metileno	mg/g	ISSA TB 145		Max 12	8 13	SI CUMPLE NO CUMPLE
Angularidad del mineral grueso	1 cara	ASTM D-5821	Mín. 85	Mín. 95	97	SI CUMPLE
	2 caras		Mín. 80	Mín. 100	92	NO CUMPLE
Angularidad del agregado fino	%	ASTM C-1252	Mín. 40	Mín. 45	33	NO CUMPLE
					39	SI CUMPLE
Equivalente de Arena	%	ASTM D-2491	Mín. 45	Mín. 45	76 - 95	SI CUMPLE
Partículas alargadas y achatadas	%	ASTM D-4791	Máx. 12	Máx. 10	2 - 5	SI CUMPLE
Desgaste de los Ángeles	%	AASHTO T-96	Máx. 35	Máx. 35	21	SI CUMPLE
Recubrimiento y peladura de pavimentos flexibles	%	AASHTO T-18	Máx. 95	Máx. 95	95	SI CUMPLE
Interperismo acelerado (sulfatos)	Grueso	AASHTO T-10	Máx. 10	Máx. 10	2	SI CUMPLE
	Fino				2	SI CUMPLE
Deletéreos	%	ASTM C-142	Máx. 1	Máx. 1	7	NO CUMPLE
					1	SI CUMPLE
Peso específico y abrasión del agregado mineral.						
		Unidades			%	gr/cm ³
Agregados	3/4"	ASTM C127			1	2,708
	1/2"				1	2,674
	3/8" lavado	ASTM C128			2	2,605
	Arena lavada	ASTM C128			2	2,615
	Filler	ASTM C128			10	2,332

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la información de la tabla 24, se puede constatar que el agregado mineral utilizado para la fabricación de este estudio presenta el incumplimiento en algunas especificaciones técnicas y las consecuencias por falta de control de las características del agregado mineral pueden ocasionar múltiples deterioros prematuros del pavimento flexible, como se detalla a continuación:

- En el ensayo realizado con azul de metileno, se evidencia que no cumplen la especificación su valor es 13 mg/g superior a los límites (MTOP, Superpave) y los problemas que se presentan en las HMA por el incumplimiento de este parámetro es: descomposición del mineral, desprendimiento de la película del ligante en la estructura granular y por último un deficiente acomodo de las partículas la asociación de estas componentes produce fallas prematuras por deformación permanente en un pavimento asfáltico.

- Otra característica analizada que presenta dificultades es la presencia de materiales deletéreos, su resultado es de 7% superior a la especificación tanto del MTOP como del método Superpave. Así mismo, se pudo constatar la presencia de arcillas y raíces luego de haber lavado el material, el aporte de dichos contaminantes a las HMA evita el recubrimiento del betún entre las partículas de la estructura granular. Estas deficiencias limitan la adhesión entre el ligante – agregado, que asociada a efectos del aire, agua, temperatura y tránsito ocasionan envejecimiento acelerado del cementante y disgregación de la estructura granular, aspectos que influyen en la depreciación en las propiedades del pavimento como: durabilidad, estabilidad y flexibilidad.

- Por otro lado, se tiene pruebas de consenso del agregado mineral, en las que constan ensayos de angularidad del pétreo grueso y fino, cuyos valores obtenidos son 92% (dos caras fracturas) y 33%, respectivamente, estos resultados no cumplen las especificaciones tanto para la normativa ecuatoriana como del sistema Superpave. El incumplimiento de estos aspectos influye en la fricción interna y cohesión entre el ligante-agregado, provocando una deficiente resistencia al desplazamiento vertical y horizontal de las HMA debido al débil empaquetamiento de las partículas al ser compactadas. Por ende, la elaboración de mezclas con este tipo de agregado es susceptible a deformaciones permanentes (ahuellamiento). Así mismo, mezclas con este tipo de estructura granular pierden capacidad de fricción entre la llanta y la capa de rodadura por la interacción entre esqueleto granular y el contenido de ligante, dando como resultado fallas por resistencia al deslizamiento.

Los deterioros expuestos anteriormente se pueden presentar en los diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja, ya que los testigos obtenidos están en función de los materiales estudiados en esta tesis y que para corregir el comportamiento del agregado mineral de aquellos ensayos que no cumplen especificaciones tanto para la normativa ecuatoriana, como la tecnología Superpave se realizan algunos ajustes que se detallan a continuación:

Dentro de los objetivos planteados en esta tesis, es corregir valores que no estén dentro de las especificaciones técnicas y como se puede observar en los resultados de caracterización del agregado (tabla 23), existen ciertos ensayos que no cumplen la normativa (MTOP,

Superpave) como son: Azul de metileno, deletéreos y angularidad del agregado fino, estas pruebas están relacionados específicamente con el material fino ($\frac{3}{8}$ " y arena) y para mejorar la calidad del agregado mineral, se realiza el lavado del mineral fino eliminando la presencia de arcillas, raíces y otros contaminantes que existen en el material con la aplicación de este proceso se cumple con los parámetros establecidos en las dos normativas antes indicadas. Así mismo, otra propiedad de consenso que se corrige es el porcentaje de dos caras fracturadas de la prueba de angularidad del material granular grueso y para mejorar su calidad se realiza la selección del material hasta que cumpla la especificación en esta característica.

4.2. Comparación granulométrica de los diseños

4.2.1. Granulometría de mezclas asfálticas elaboradas en el Municipio de Loja

Para el análisis y comparación de resultados se toma dos muestras de mezcla asfáltica en caliente elaboradas en la planta de asfalto del Municipio de Loja, tanto para bacheo como para tendido en vía y los valores conseguidos de cada diseño se describe en la tabla 25 y en las figuras 41 y 42.

Tabla 25

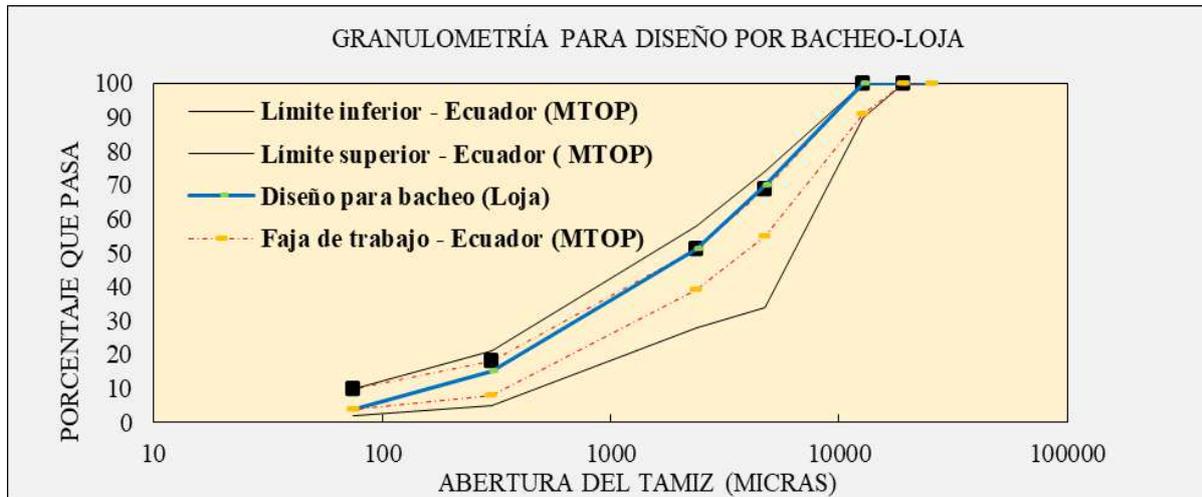
Granulometrías diseños en la ciudad de Loja.

Abertura (mm)	Designación	Porcentaje que pasa	
		Diseño bacheo	Diseño vía
25,00	1"	100,00	100,00
19,00	3/4"	100,00	100,00
12,50	1/2"	100,00	96,00
9,50	3/8"	96,00	88,00
4,75	N°4	70,00	57,00
2,36	N°8	51,00	42,00
0,30	N°50	15,00	18,00
0,08	N°200	4,00	7,00
Contenido de asfalto (%)		5,90	5,46
Relación filler/betún (0.80 - 1.20)		0,69	1,29

Fuente: Elaboración propia.

Figura 41

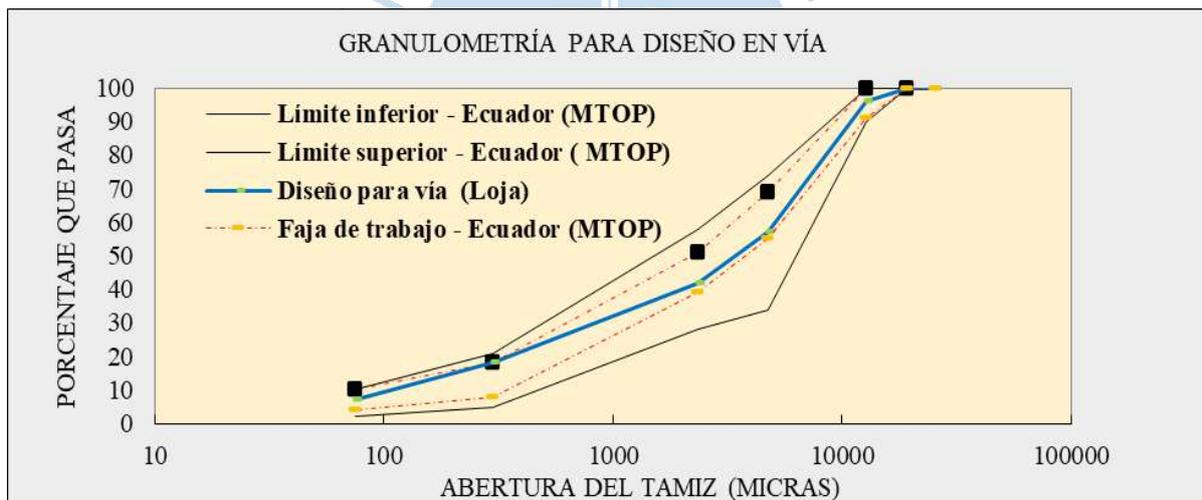
Curva granulométrica mezcla Municipio de Loja (bacheo).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42

Curva granulométrica mezcla Municipio de Loja (vía).



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en las gráficas, los diseños de pavimentos bituminosos elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja utilizan un tamaño nominal del agregado mineral de 12,5 mm, así mismo su estructura granular se encuentran dentro de los límites granulométricos para una faja de trabajo de ½ pulgada, como lo determina la normativa ecuatoriana (MTOP) y que son similares a la especificación ASTM D3515.

En cambio, en la tabla 25, se puede apreciar que la relación filler/betún para los dos diseños no cumplen esta especificación, debido a la falta o por el exceso del material retenido en la malla N°200 mm. Esta desventaja afecta a la variación en el porcentaje de ligante e influye en la cohesión de los agregados de la mezcla asfáltica, provocando que se forme una película de ligante exageradamente fina o gruesa entre las partículas del agregado en ambas situaciones

el resultado va a ser una pérdida de fricción interna y cohesión entre sus partículas, la falla más probable que suceda en estas condiciones es por deformación permanente.

4.2.2. Granulometrías propuestas para mezclas asfálticas por el sistema Superpave

Como se manifestó anteriormente, este proyecto está direccionado a la innovación en el proceso de diseño de mezclas bituminosas y como parte fundamental de la presente tesis es la implementación del entorno granulométrico del método Superpave a nivel I, como también estructuras granulares que proporcionen adecuados desempeños bajo el valor del módulo de rigidez. Para esto se plantean tres diseños con graduaciones diferentes con la finalidad de evaluar y comparar los resultados, como se puede ver en la tabla 26 y en las figuras 43, 44 y 45 que corresponde al diseño A, B, C, respectivamente. Todos los escenarios propuestos se elaboran con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " en referencia a la especificación del esqueleto granular de la normativa ecuatoriana es importante manifestar que las graduaciones propuestas cumplen con la caracterización del agregado mineral, parámetros volumétricos de la mezcla establecidos para la metodología Marshall como Superpave, pero al aplicarlos en obra tendrían diferente comportamiento, cuando se evalúe con el módulo de rigidez.

Tabla 26

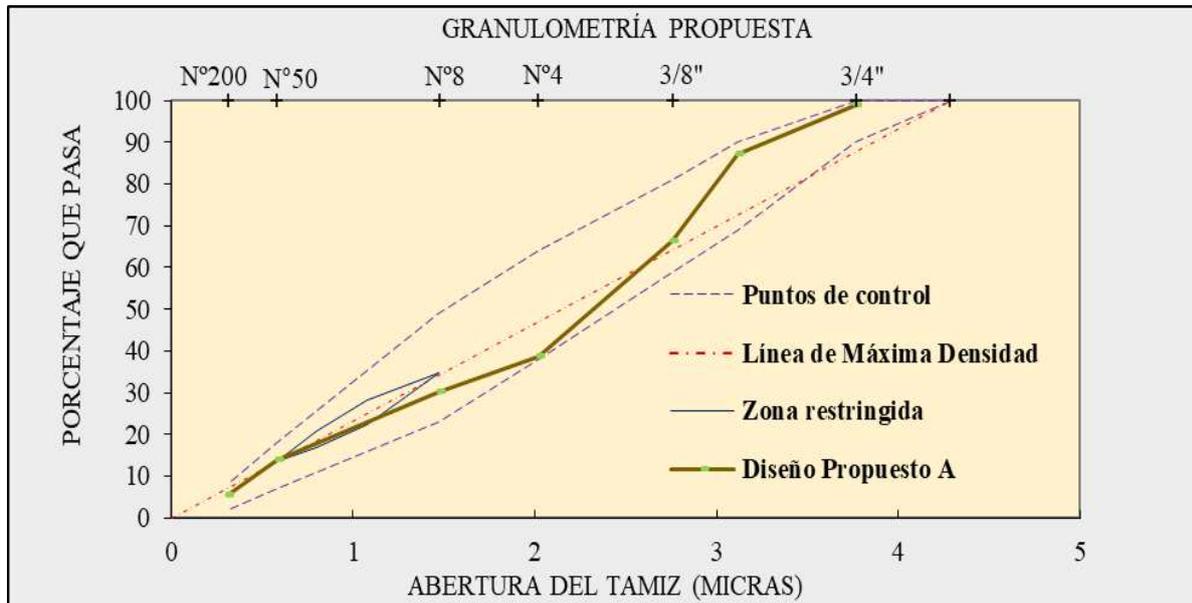
Granulometrías utilizadas para nuevos diseños de mezcla.

Abertura (mm)	(Abertura) ^ 0.45	Detalle	Porcentaje que pasa		
			Diseño A	Diseño B	Diseño C
25,00	4,26	1"	100	100	100
19,00	3,76	3/4"	99	95	99
12,50	3,12	1/2"	87	82	90
9,500	2,75	3/8"	66	71	80
4,750	2,02	N°4	39	45	64
2,360	1,47	N°8	30	30	43
0,300	0,58	N°50	14	9	8
0,075	0,31	N°200	5	5	5

Fuente: Elaboración propia.

Figura 43

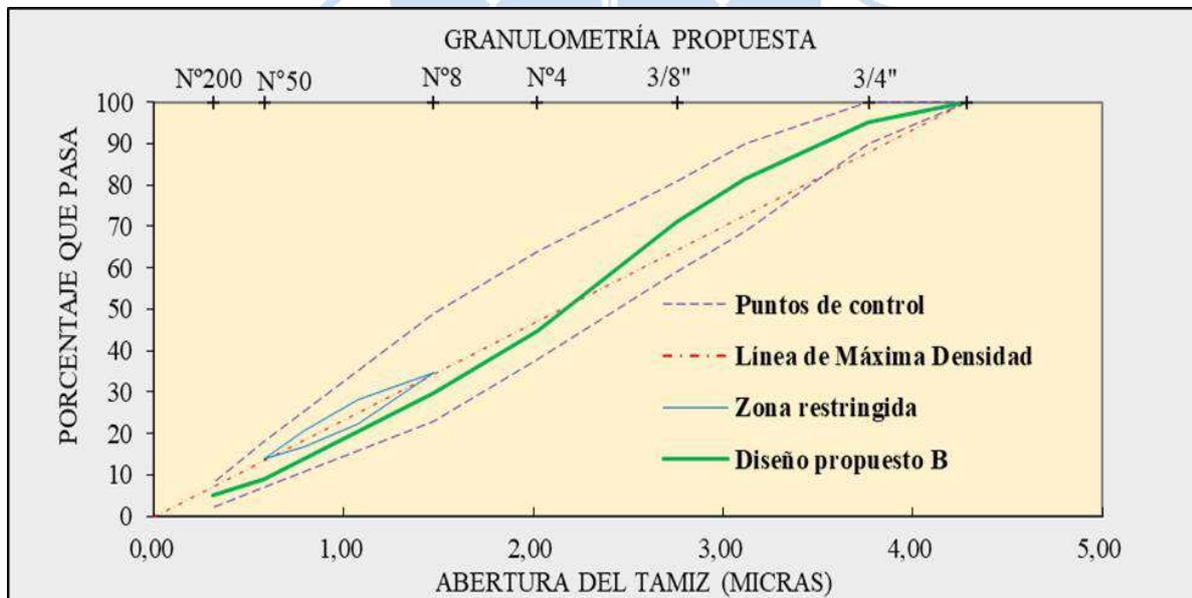
Curva granulométrica para el diseño A.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44

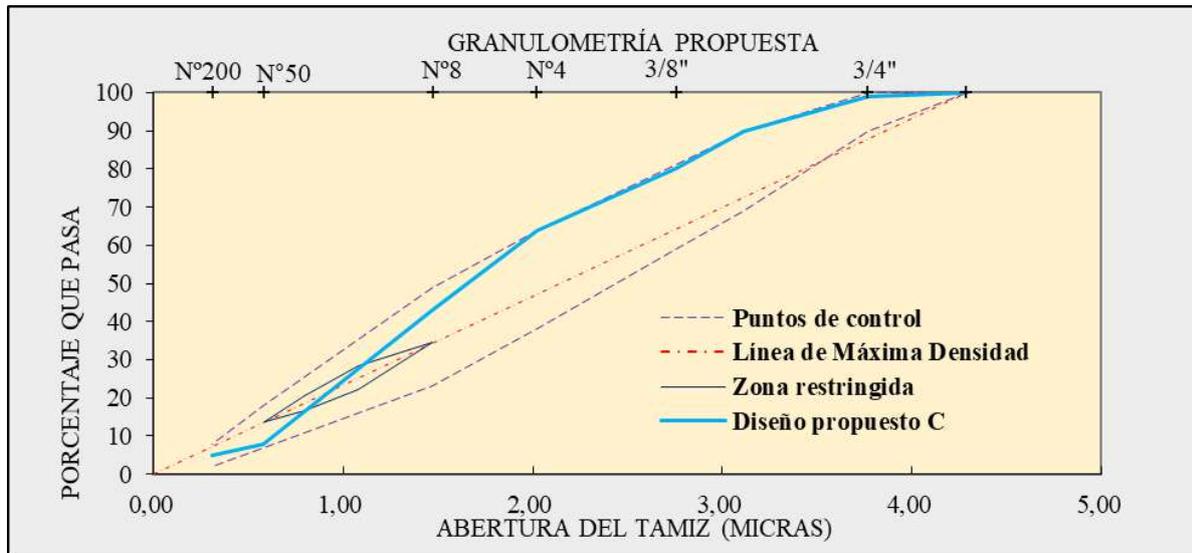
Curva granulométrica para el diseño B.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 45

Curva granulométrica para el diseño C.



Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de la combinación granulométrica en todos los diseños planteados se realiza el cribado de cada uno de los tamaños (porcentaje) que componen los materiales de mezcla, con el propósito de conseguir una dosificación perfecta de cada una de las gráficas de los modelos propuestos.

4.3. Comportamiento volumétrico de la mezcla

4.3.1. Diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja

Para evaluar el comportamiento de las componentes volumétricas de una HMA recién elaborada en la planta de asfalto del Municipio de Loja, se elabora la tabla 27, en la cual se encuentran los resultados obtenidos de los testigos tanto para bacheo como para tendido en vía.

Tabla 27

Parámetros volumétricos de diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja.

Mezcla Loja	Contenido de asfalto (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia (mm)	Densidad (gr/cm ³)	Vacíos con aire (%)	Vacíos con agregado mineral (%)	Relación betún vacíos (%)	Peso específico o máximo teórico (gr/cm ³)	Relación Filler/betún
Bacheo	5,90	2003,00	18,00	2,300	5,18	18,65	72,29	2,451	0,69
Vía	5,46	1419,00	14,00	2,225	4,30	16,40	73,92	2,358	1,29

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados expuestos en la Tabla 27, se puede observar que en el diseño de mezcla para bacheo tiene los siguientes parámetros volumétricos: contenido de asfalto 5,90%, flujo 18 mm., estabilidad de 2003 lb al comparar estos valores con las especificaciones

del Ecuador, la componente volumétrica que no cumple es el flujo ya que es superior a 14 mm. (ver Tabla 10). En cambio, en el diseño de mezclas en vía se obtiene: una cantidad de ligante 5,46%, flujo de 14 mm, estabilidad 1419 lb aquí sucede lo contrario, cumple para flujo, pero no para estabilidad ya que su valor es inferior a 1860 lb que es el parámetro mínimo que debe cumplirse en la especificación ecuatoriana (ver Tabla 10).

Así mismo, se puede ver en los resultados de las dos mezclas estudiadas que existe bastante variación respecto a ciertas componentes volumétricas como los valores de estabilidad y flujo que cumple para un diseño, en cambio para el otro tipo de diseño no lo hace. Este comportamiento puede suceder por la relación del filler betún, ya que para los dos diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja no cumplen la especificación, como también el porcentaje de vacíos que está al límite de la normativa por falta de material retenido en la malla N°200 evitando que cubra todos los espacios entre partículas de la mezcla. Otras variables que puede ocasionar este inconveniente es el incumplimiento de valores obtenidos respecto a ensayos de azul de metileno y deletéreos (presencia de arcilla raíces y otros contaminantes), debido a que las mezclas analizadas se hicieron con este tipo de materiales; de igual forma puede existir variabilidad en la dosificación de los materiales al momento de elaborar la carpeta asfáltica en planta, produciendo una mezcla heterogénea o a su vez haya segregación del agregado.

Con la explicación de los parámetros volumétricos y referente a los resultados extraídos de los diseños de mezclas tanto de bacheo y vía, se hace notar que de las HMA presentan algunas deficiencias de diseño como: limitación en el acomodo de las partículas ya sea por el incremento o disminución del contenido de asfalto, estabilidad, porcentaje de los vacíos y la relación filler- betún, ya que estas propiedades son atribuidas principalmente al incumplimiento del valor angularidad del agregado fino, debido a forma y textura de las partículas de empaquetamiento de la mezclas y este tipo de comportamiento es asociado a fallas por deformación permanente.

4.3.2. Diseños de mezclas asfálticas propuestos en la investigación

Para determinar el comportamiento de los parámetros volumétricos respecto a diseños de las HMA planteados, se utiliza el sistema Marshall y el procedimiento como los resultados de cada diseño, se describe de la siguiente manera:

- En la tabla 28 y figura 46, se describen los valores para el escenario A.
- En la tabla 29 y figura 47, se describen los valores para el escenario B.
- En la tabla 30 y figura 48, se describen los valores para el escenario C.

Tabla 28

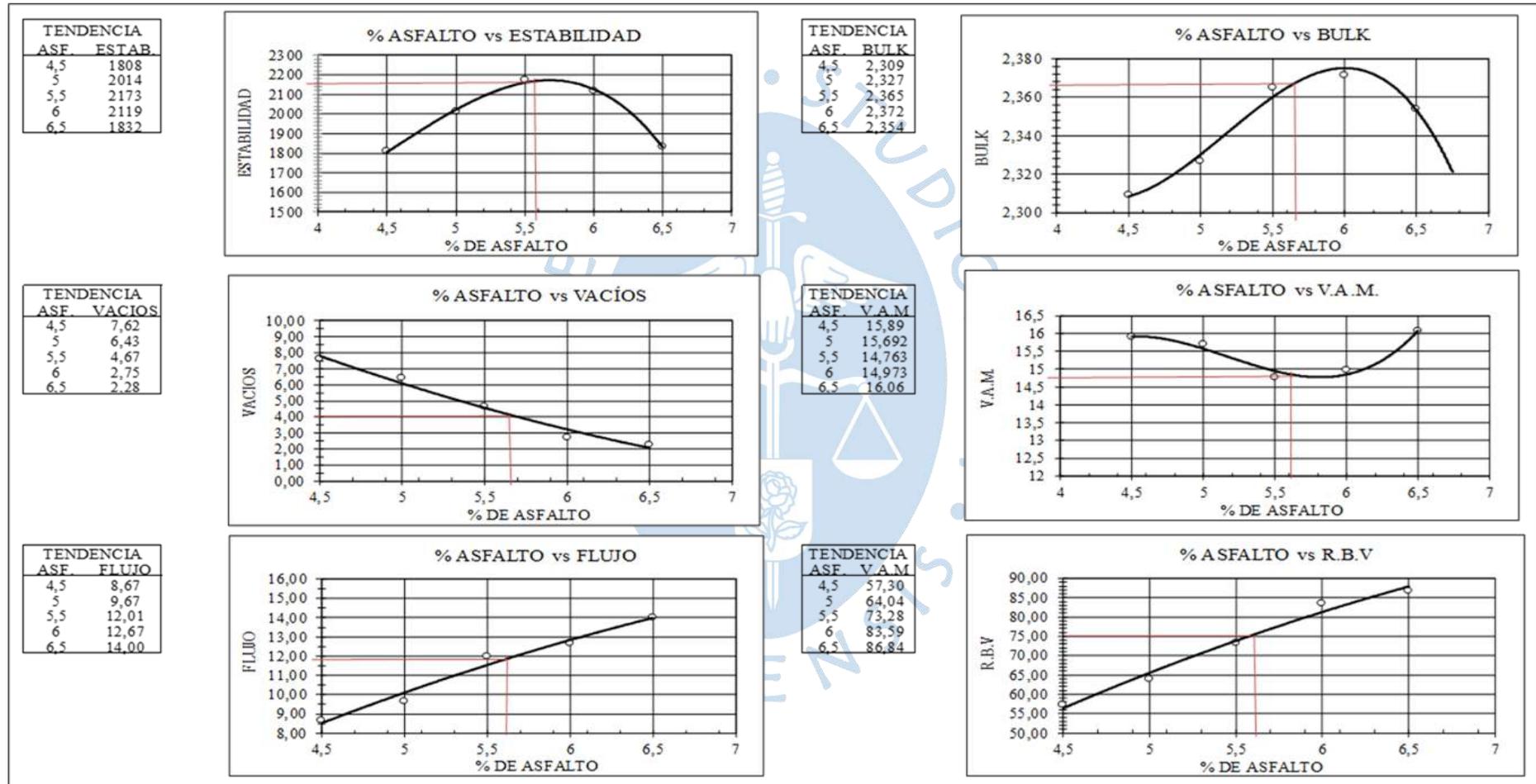
Datos de parámetros volumétricos para el diseño A.

CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO DISEÑO A																								
MATERIALES				MEZCLA ASFALTICA										% EN VOL.			ESTABILIDAD (lbs)							
AGREGADOS	% AGREGADOS	% DOSIFICACION	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECIFICO 25/25°C ASFALTIC	MUESTRA	P. Aire Seo (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECIFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (gr/cm³)	% ASFALTO ABSORVIDO	VACIOS CON AIRE	C.A. AFECTIVO	% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA	% RELACION BITUMEN VACIOS	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"	
3/4"	30,00	28,65	2,708		1	994,83	995,10	564,81	430,29	2,312		W. m.	1000,03							1,39	5,62	1260	1752	8
1/2"	24,00	22,92	2,674		2	1007,70	1009,12	569,14	439,98	2,290		W. f+a	6880,00							1,32	6,01	1348	1779	9
3/8"	20,00	19,10	2,605		3	991,10	998,11	571,95	426,16	2,326		W. f+a+m	7480,00							1,39	6,07	1361	1892	9
lavado																								
Arena lav	16,00	15,28	2,615																					
Filler	10,00	9,55	2,332																					
C.A.		4,50		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,622				PROMEDIO			2,309	2,448	2,500	0,889	7,62	8,27	15,89	3,65	57,30				1808	9	
3/4"	30,00	28,50	2,708		1	883,17	884,49	507,80	376,69	2,345		W. m.	1000,18							1,79	4,90	1099	1967	10
1/2"	24,00	22,80	2,674		2	994,36	995,98	570,40	425,58	2,336		W. f+a	6880,00							1,39	6,60	1480	2057	10
3/8"	20,00	19,00	2,605		3	934,69	937,78	531,37	406,41	2,300		W. f+a+m	7478,00							1,47	6,12	1372	2018	9
Arena lav	16,00	15,20	2,615																					
Filler	10,00	9,50	2,332																					
C.A.		5,00		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,622				PROMEDIO			2,327	2,430	2,487	0,991	6,43	9,26	15,69	4,06	64,04				2014	10	
3/4"	30,00	28,35	2,708		1	1019,03	1019,64	589,94	429,70	2,371		W. m.	1000,15							1,39	6,93	1554	2160	12
1/2"	24,00	22,68	2,674		2	930,88	932,39	533,55	398,84	2,334		W. f+a	6880,00							1,56	6,23	1397	2180	12
3/8"	20,00	18,90	2,605		3	966,99	969,26	564,61	404,65	2,390		W. f+a+m	7477,00							1,56	6,23	1397	2180	12,02
Arena lav	16,00	15,12	2,615																					
Filler	10,00	9,45	2,332																					
C.A.		5,50		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,622				PROMEDIO			2,365	2,412	2,481	1,211	4,67	10,10	14,76	4,36	73,28				2173	12	
3/4"	30,00	28,20	2,708		1	1028,57	1028,80	600,11	428,69	2,399		W. m.	1000,05							1,39	6,61	1482	2060	12
1/2"	24,00	22,56	2,674		2	981,19	981,71	566,96	414,75	2,366		W. f+a	6880,00							1,47	6,54	1467	2156	13
3/8"	20,00	18,80	2,605		3	969,28	970,02	557,61	412,41	2,350		W. f+a+m	7470,00							1,47	6,49	1455	2140	13
Arena lav	16,00	15,04	2,615																					
Filler	10,00	9,40	2,332																					
C.A.		6,00		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,622				PROMEDIO			2,372	2,395	2,439	0,800	2,75	12,22	14,97	5,25	83,59				2119	13	
3/4"	30,00	28,05	2,708		1	938,89	939,34	539,43	399,91	2,348		W. m.	1000,19							1,56	5,18	1162	1812	14
1/2"	24,00	22,44	2,674		2	1051,67	1052,04	605,82	446,22	2,357		W. f+a	6880,00							1,25	6,53	1464	1831	14
3/8"	20,00	18,70	2,605		3	1014,24	1014,47	584,25	430,22	2,357		W. f+a+m	7465,00							1,39	5,95	1334	1855	14
Arena lav	16,00	14,96	2,615		4																			
Filler	10,00	9,35	2,332																					
C.A.		6,50		1,016																				
TOTAL	100	100	2,622				PROMEDIO			2,354	2,378	2,409	0,583	2,28	13,78	16,06	5,95	86,84				1832	14	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 46

Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño A.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29

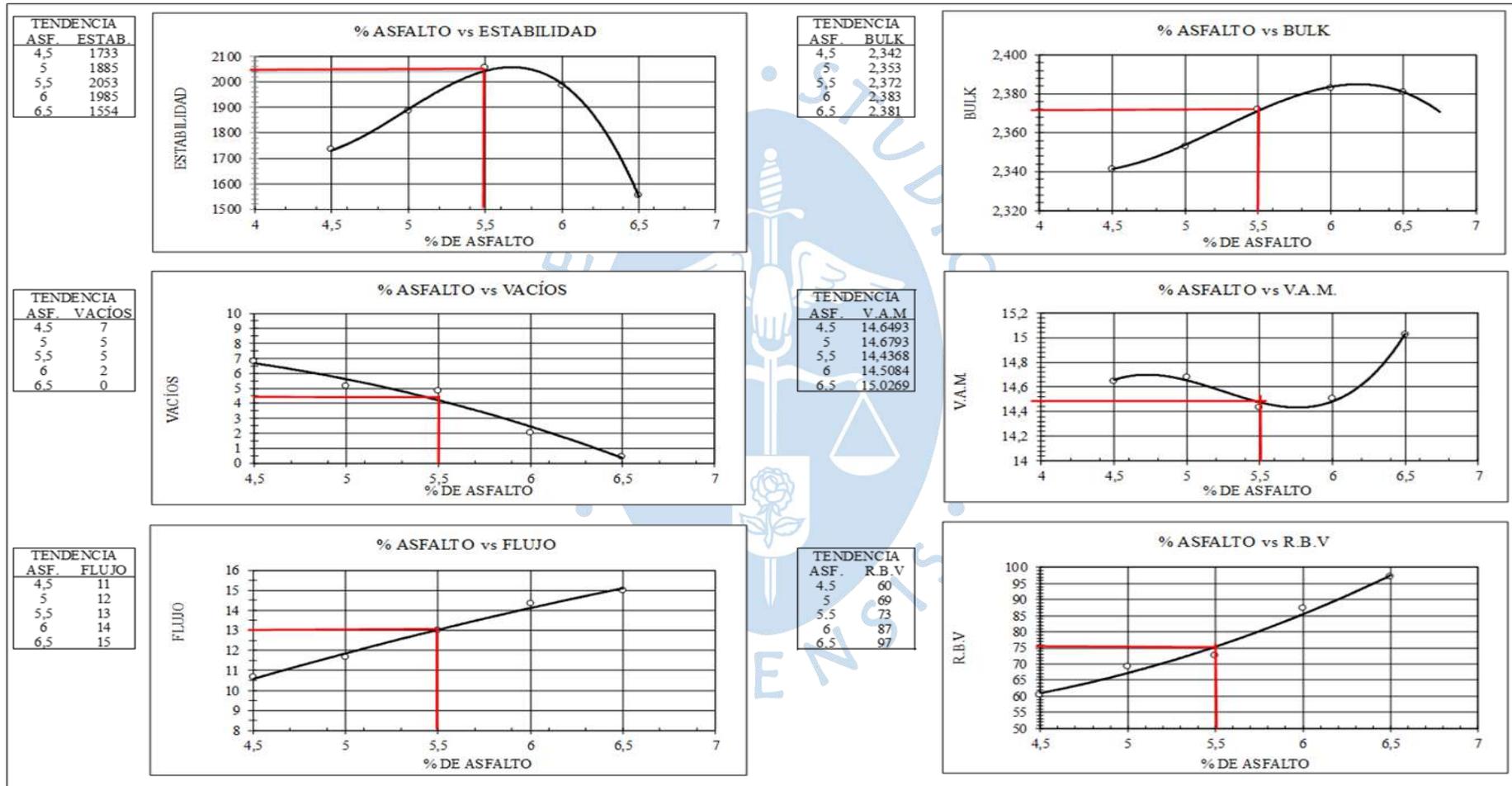
Datos de parámetros volumétricos para el diseño B.

CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO DISEÑO B																								
AGREGADOS	MATERIALES				MEZCLA ASFALTICA										% EN VOL.					ESTABILIDAD (lbs)				
	% AGREGADOS	% DOSIFICACION	PESO ESPECIFICO AGREGADOS	PESO ESPECIFICO 2525°C	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm³)	PESO ESPECIFICO BULK (gr/cm³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (gr/cm³)	% ASFALTO ABSORVIDO	AGREGADOS VACIOS CON AIRE	C.A. AFECTIVO	% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA	% RELACION BITUMEN VACIOS	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"		
3/4"	20,00	19,10	2,708		1	1196,06	1203,49	697,82	505,67	2,365		W. m.	1000,05					1,04	7,44	1669	1735	10		
1/2"	28,00	26,74	2,674		2	1170,06	1177,18	677,82	499,36	2,343		W. f+a	6880,00					1,04	6,75	1514	1574	11		
3/8" lav	37,00	35,34	2,605		3	1033,96	1043,86	597,48	446,38	2,316		W. f+a+m	7482,00					1,25	6,74	1512	1889	11		
Arena lav	7,00	6,69	2,615																					
Filler	8,00	7,64	2,332																					
C.A.		4,50		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,620	2,54587442		PROMEDIO				2,342	2,446		RICE	2,512	1,127	85,35	6,80	7,85	14,65	3,42	60,41	1733	11	
3/4"	20,00	19,00	2,708		1	1269,26	1272,82	732,06	540,76	2,347		W. m.	1000,16					0,93	8,79	1971	1833	11		
1/2"	28,00	26,60	2,674		2	1271,43	1275,03	738,38	536,65	2,369		W. f+a	6880,00					0,93	8,75	1962	1825	12		
3/8" lav	37,00	35,15	2,605		3	969,45	972,18	558,39	413,79	2,343		W. f+a+m	7477,00					1,47	6,06	1359	1998	12		
Arena lav	7,00	6,65	2,615																					
Filler	8,00	7,60	2,332																					
C.A.		5,00		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,620			PROMEDIO				2,353	2,428		RICE	2,481	0,917	85,32	5,15	9,53	14,68	4,13	69,22	1885	12	
3/4"	20,00	18,90	2,708		1	1285,99	1287,84	754,06	533,78	2,409		W. m.	1000,12					0,96	10,64	2386	2291	12		
1/2"	28,00	26,46	2,674		2	1186,86	1188,39	686,97	501,42	2,367		W. f+a	6880,00					1,04	7,98	1790	1861	13		
3/8" lav	37,00	34,97	2,605		3	977,76	978,15	560,40	417,75	2,341		W. f+a+m	7479,00					1,47	6,09	1366	2008	14		
Arena lav	7,00	6,62	2,615																					
Filler	8,00	7,56	2,332																					
C.A.		5,50		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,620			PROMEDIO				2,372	2,411		RICE	2,493	1,455	85,56	4,86	9,58	14,44	4,13	72,56	2053	13	
3/4"	20,00	18,80	2,708		1	1151,84	1153,58	674,08	479,50	2,402		W. m.	1000,05					1,14	7,68	1722	1963	14		
1/2"	28,00	26,32	2,674		2	1133,67	1134,67	661,16	473,51	2,394		W. f+a	6880,00					1,14	8,37	1877	2140	14		
3/8" lav	37,00	34,78	2,605		3	1097,52	1099,34	632,76	466,58	2,352		W. f+a+m	7469,00					1,19	6,94	1556	1852	15		
Arena lav	7,00	6,58	2,615																					
Filler	8,00	7,52	2,332																					
C.A.		6,00		1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,620			PROMEDIO				2,383	2,393		RICE	2,433	0,724	85,49	2,06	12,45	14,51	5,32	87,25	1985	14	
3/4"	20,00	18,70	2,708		1	1284,14	1286,51	750,08	536,43	2,394		W. m.	1000,17					0,93	7,04	1579	1468	15		
1/2"	28,00	26,18	2,674		2	1118,76	1120,31	650,68	469,63	2,382		W. f+a	6880,00					1,19	6,09	1366	1625	15		
3/8" lav	37,00	34,60	2,605		3	1124,72	1126,21	651,08	475,13	2,367		W. f+a+m	7462,00					1,14	6,13	1375	1567	15		
Arena lav	7,00	6,55	2,615		4																			
Filler	8,00	7,48	2,332																					
C.A.		6,50		1,016																				
TOTAL	100	100	2,620			PROMEDIO				2,381	2,376		RICE	2,392	0,294	84,97	0,45	14,58	15,03	6,23	97,15	1554	15	

Fuente: Elaboración propia.

Figura 47

Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño B.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30

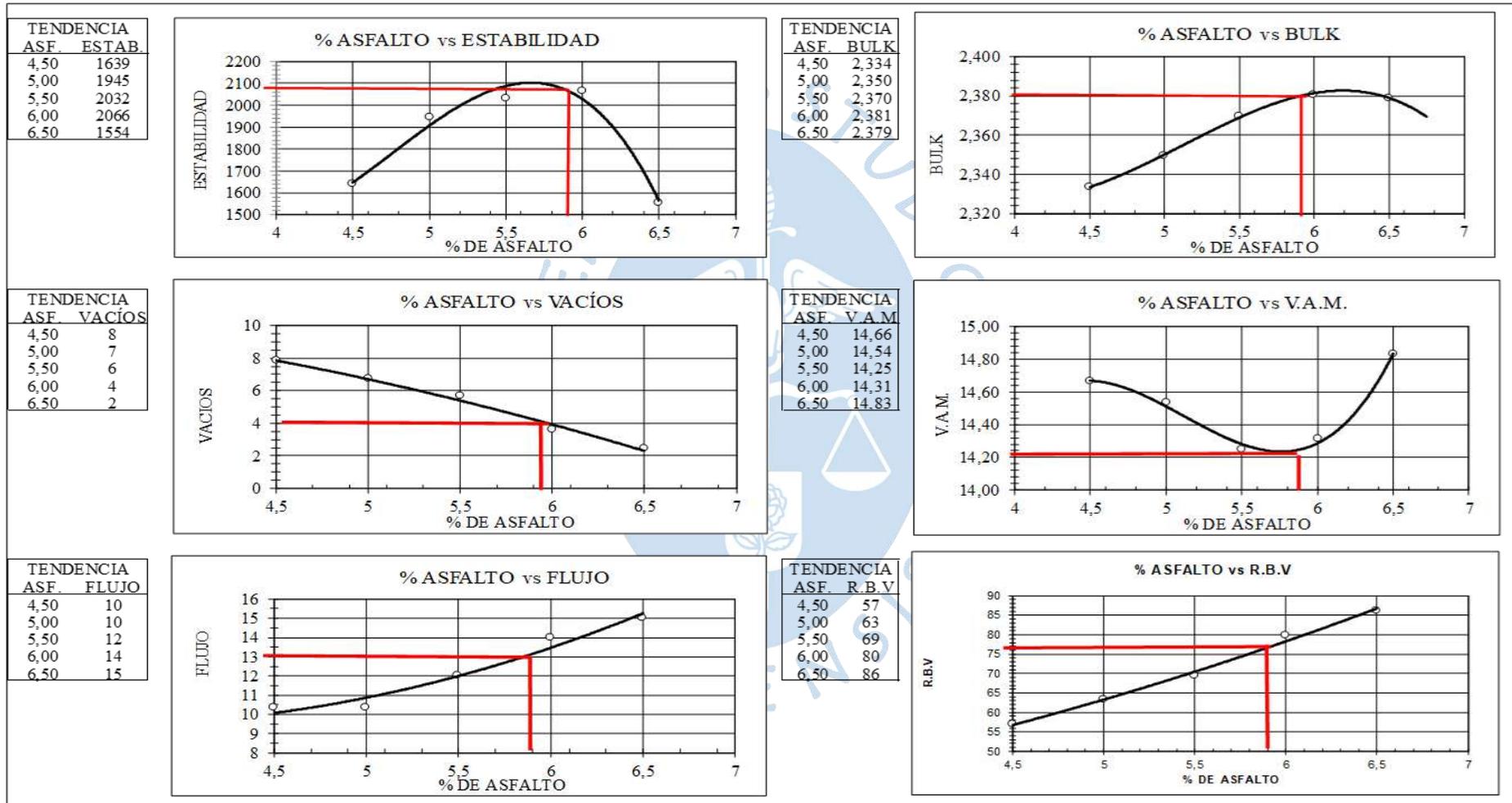
Datos de parámetros volumétricos para el diseño C.

CONTROL DE LA MEZCLA ASFALTICA EN LABORATORIO DISEÑO C																								
AGREGADOS	MATERIALES				MEZCLA ASFALTICA										% EN VOL.				ESTABILIDAD (lbs)					
	% AGREGADOS	% DOSIFICACION	PESO ESPECIFICO AGREGADOS (gr)	PESO ESPECIFICO 2525°C ASFALTO	MUESTRA	P. Aire Seco (gr)	P. Aire S.S.S. (gr)	P. agua (gr)	VOLUMEN (cm ³)	PESO ESPECIFICO BULK (gr/cm ³)	PESO ESPECIFICO MAXIMO	PESO ESPECIFICO MAXIMO MEDIDO (gr/cm ³)	% ASFALTO ABSORBIDO	AGREGADOS	VACIOS CON AIRE	C. A. AFECTIVO	% VACIOS EN AGREGADOS MINERALES	% ASFALTO EFECTIVO EN LA	% RELACION BITUMEN VACIOS	FACTOR DE CORRECCION	LECTURA (kN)	LECTURA (lbs)	CORREGIDA	FLUJO 0.01"
3/4"	15,00	14,33	2,708		1	1191,06	1202,49	696,82	505,67	2,355		W. m	1000,02							1,04	7,35	1648	1714	10
1/2"	22,00	21,01	2,674		2	1169,06	1178,18	676,82	501,36	2,332		W. f-a	6880,00							1,04	5,95	1334	1388	10
3/8" lav	41,00	39,16	2,605		3	1032,95	1042,85	596,47	446,38	2,314		W. f-a+m	7485,00							1,25	6,47	1451	1814	11
Arena	14,00	13,37	2,615																					
Filler	8,00	7,64	2,332																					
C.A.	4,50			1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,612			PROMEDIO				2,334	2,439	RICE	2,532	1,565	85,34	7,81	6,85	14,66	3,01	56,95			1639	10
3/4"	15,00	14,25	2,708		1	1268,25	1271,81	731,05	540,76	2,345		W. m	1000,17							0,93	8,97	2012	1871	10
1/2"	22,00	20,90	2,674		2	1270,42	1274,02	736,36	537,66	2,363		W. f-a	6880,00							0,93	8,57	1922	1787	10
3/8" lav	41,00	38,95	2,605		3	968,44	971,17	557,38	413,79	2,340		W. f-a+m	7483,00							1,47	6,60	1480	2176	11
Arena	14,00	13,30	2,615																					
Filler	8,00	7,60	2,332																					
C.A.	5,00			1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,612			PROMEDIO				2,350	2,422	RICE	2,518	1,670	85,46	6,70	7,84	14,54	3,41	63,31			1945	10
3/4"	15,00	14,18	2,708		1	1284,98	1286,83	753,05	533,78	2,407		W. m	1000,14							0,96	10,34	2319	2226	12
1/2"	22,00	20,79	2,674		2	1185,85	1187,38	685,96	501,42	2,365		W. f-a	6880,00							1,04	7,98	1790	1861	11
3/8" lav	41,00	38,75	2,605		3	976,75	977,14	559,30	417,84	2,338		W. f-a+m	7482,00							1,47	6,09	1366	2008	13
Arena	14,00	13,23	2,615																					
Filler	8,00	7,56	2,332																					
C.A.	5,50			1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,612			PROMEDIO				2,370	2,404	RICE	2,512	1,893	85,75	5,66	8,59	14,25	3,71	69,41			2032	12
3/4"	15,00	14,10	2,708		1	1150,83	1152,57	673,07	479,50	2,400		W. m	1000,04							1,14	7,85	1760	2007	14
1/2"	22,00	20,68	2,674		2	1132,65	1133,66	660,17	473,49	2,392		W. f-a	6880,00							1,14	9,02	2023	2306	13
3/8" lav	41,00	38,54	2,605		3	1096,51	1098,33	631,75	466,58	2,350		W. f-a+m	7475,00							1,19	7,06	1583	1884	15
Arena	14,00	13,16	2,615																					
Filler	8,00	7,52	2,332																					
C.A.	6,00			1,016	4																			
TOTAL	100	100	2,612			PROMEDIO				2,381	2,387	RICE	2,469	1,485	85,69	3,57	10,74	14,31	4,60	79,73			2066	14
3/4"	15,00	14,03	2,708		1	1283,13	1285,50	749,07	536,43	2,392		W. m	1000,18							0,93	6,95	1559	1450	15
1/2"	22,00	20,57	2,674		2	1117,75	1119,30	649,67	469,63	2,380		W. f-a	6880,00							1,19	5,99	1343	1599	15
3/8" lav	41,00	38,34	2,605		3	1123,71	1125,20	650,07	475,13	2,365		W. f-a+m	7470,00							1,14	6,31	1415	1613	15
Arena	14,00	13,09	2,615		4																			
Filler	8,00	7,48	2,332																					
C.A.	6,50			1,016																				
TOTAL	100	100	2,612			PROMEDIO				2,379	2,370	RICE	2,438	1,271	85,17	2,43	12,39	14,83	5,31	86,21			1554	15

Fuente: Elaboración propia.

Figura 48

Comportamiento de parámetros volumétricos para el diseño C.



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 31, se describen una síntesis de las componentes volumétricas para los diseños propuestos (A, B, C) y los valores obtenidos en todos los escenarios plantados, cumplen con las especificaciones técnicas formuladas por la normativa ecuatoriana.

Tabla 31

Parámetros volumétricos de diseños propuestos.

Diseños Propuestos	Contenido de asfalto (%)	Estabilidad (lb)	Fluencia mm	Densidad (gr/cm ³)	Vacíos con aire (%)	Vacíos con agregado mineral (%)	Relación betún vacíos (%)	Peso específico máximo teórico (gr/cm ³)	Relación Filler/betún
A	5,60	1988,00	13,00	2,373	4,37	17,42	75,00	2,481	0,95
B	5,50	2071,00	13,00	2,388	4,44	17,31	74,37	2,493	0,94
C	5,90	2769,00	12,00	2,288	4,60	17,86	74,27	2,398	0,85

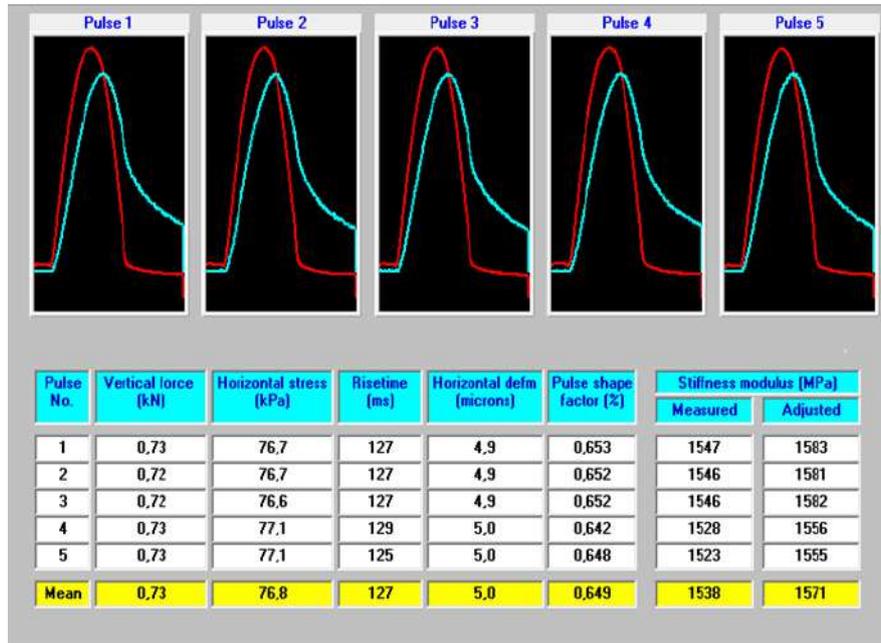
Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados, se observa que los tres diseños poseen ajustado el parámetro de relación betún-vacíos a 75% que es el máximo valor que exige la especificación (MTOPI), también se hace notar que el diseño C posee un alto valor de estabilidad y menor rango de flujo de entre todos los diseños propuestos, pero falta analizar el comportamiento del módulo de rigidez para evaluar su desempeño.

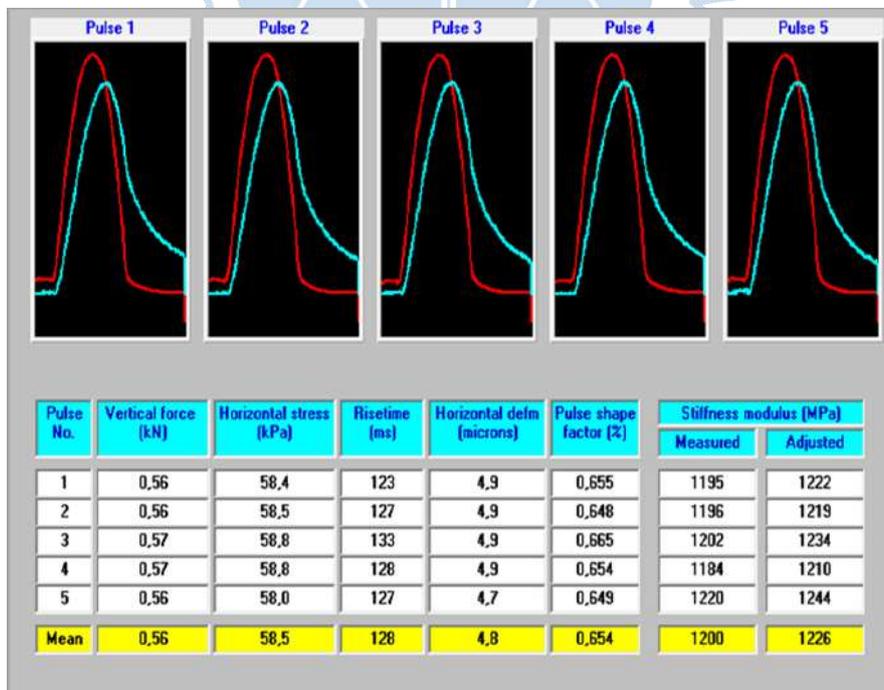
4.4. Comportamiento del módulo de rigidez (NAT)

4.4.1. Módulo de rigidez para diseños habituales producidos en la ciudad de Loja

En las figuras 49, 50, 51 y 52, se indican el desempeño del módulo de rigidez para los testigos elaborados en la planta del municipio de Loja, tanto para bacheo como para tendido de carpeta, respectivamente.

Figura 49*Prueba de módulo de rigidez para bacheo muestra # 1.*

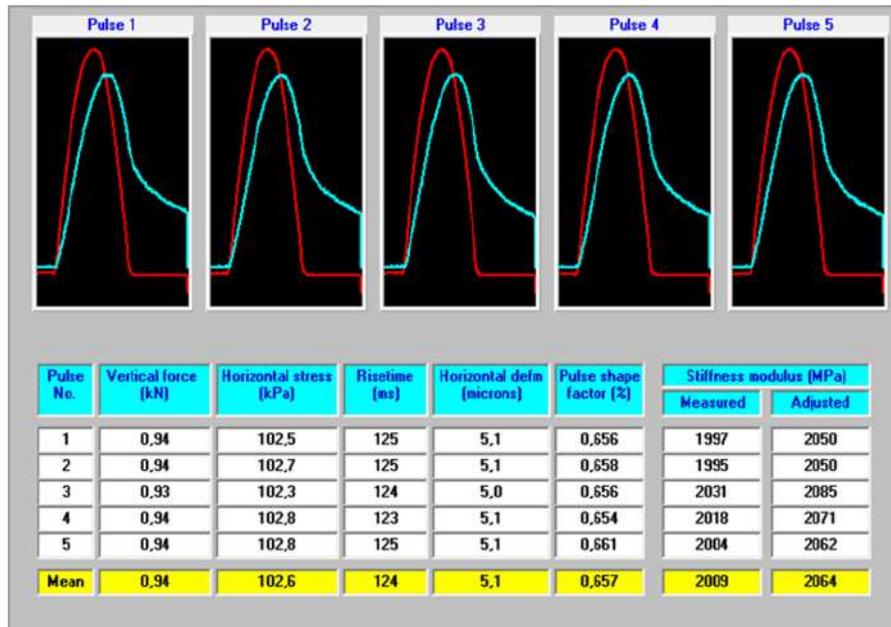
Fuente: Elaboración propia.

Figura 50*Prueba de módulo de rigidez para bacheo muestra # 2*

Fuente: Elaboración propia.

Figura 51

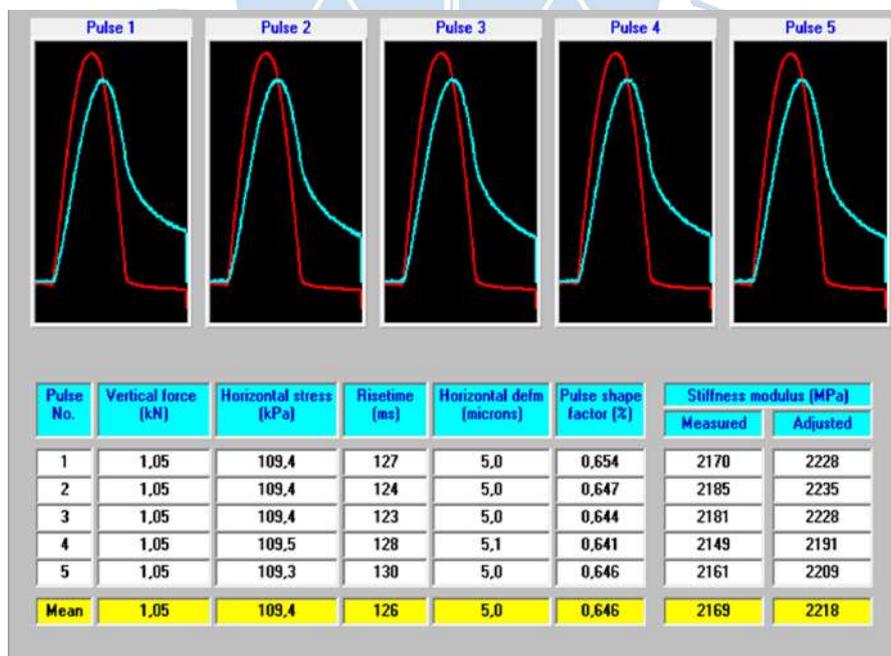
Prueba de módulo de rigidez para tendido en vía muestra # 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52

Prueba de módulo de rigidez para tendido en vía muestra # 2.



Fuente: Elaboración propia.

En las figuras se observa el valor obtenido del módulo de rigidez para cada uno de los diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja y el promedio del conjunto de datos es 1770 MPa dicho parámetro se encuentra por debajo del módulo de rigidez de 2500 MPa e indica que el pavimento se encuentra a un nivel inadecuado.

El valor bajo que poseen los diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja puede tener relación ya sea con el excesivo flujo para el primer tipo de mezcla (bacheo) o a su vez por el insuficiente valor de estabilidad para la segunda muestra (carpeta asfáltica), en lo que respecta a parámetros volumétricos evaluados por la metodología Marshall (ver tabla 27). Así mismo, este comportamiento puede presentarse por los contaminantes que tuvieron los agregados finos, el incumplimiento de la relación filler-betún o por el valor mínimo de angularidad de la estructura granular fina que influyen principalmente en el empaquetamiento de las partículas de la mezcla.

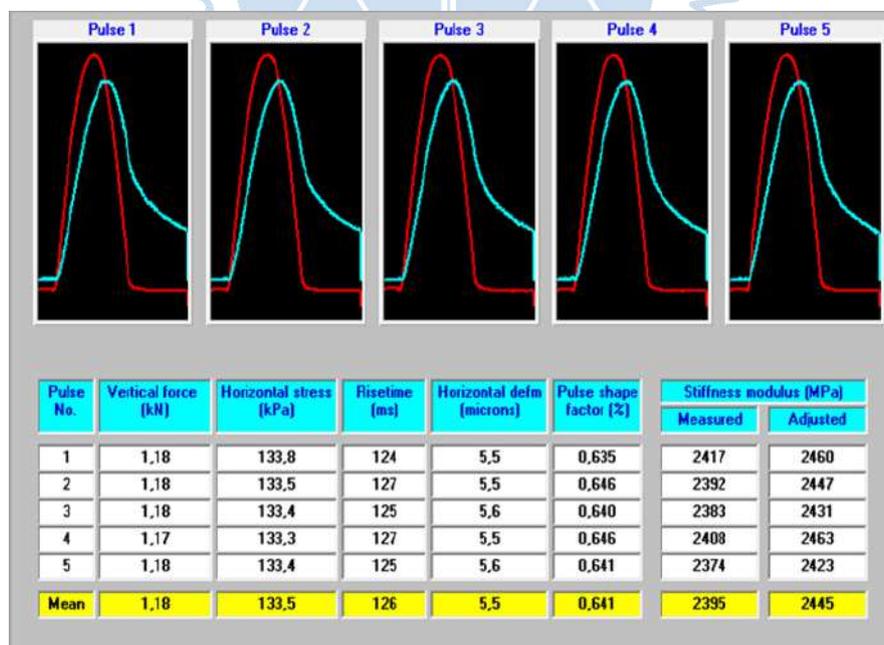
4.4.2. Módulo de rigidez para diseños propuestos

El procedimiento se realiza también para los tres diseños nuevos. Los resultados de los testigos evaluados con el equipo NAT bajo el valor de módulo de rigidez se indican a continuación:

- **Resultados del diseño A.** Se observan en las figuras 53 y 54.

Figura 53

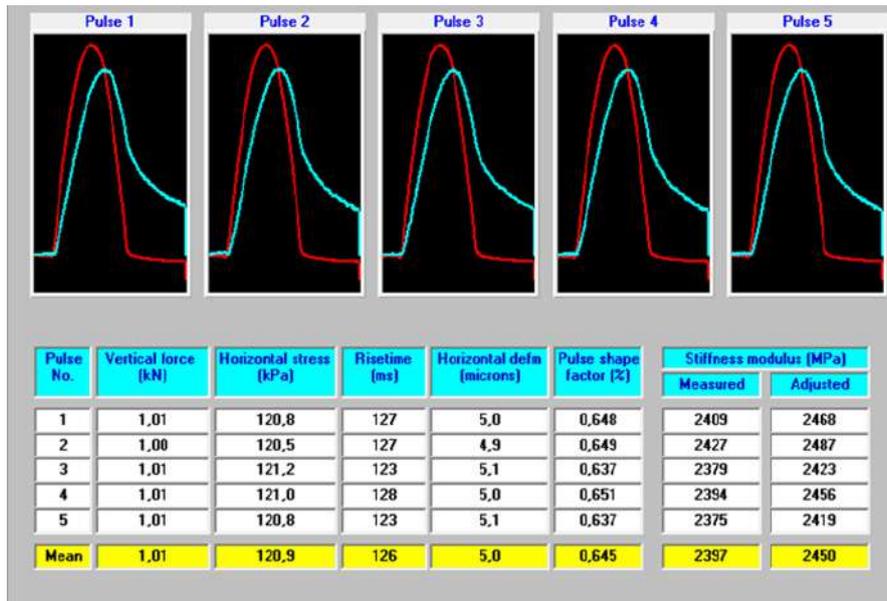
Prueba de módulo de rigidez para el diseño A, probeta # 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 54.

Prueba de módulo de rigidez para el diseño A, probeta # 2.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar las figuras para el diseño A, el valor promedio del módulo de rigidez para este escenario es 2450 MPa ofrece mejores resultados que los diseños realizados en la planta de asfalto de la ciudad de Loja. A pesar de que todos los parámetros volumétricos por el método Marshall se cumplen adecuadamente y también se realizan todos los protocolos de seguridad para cumplir especificaciones del agregado mineral, tanto para el MTOP como para el sistema Superpave.

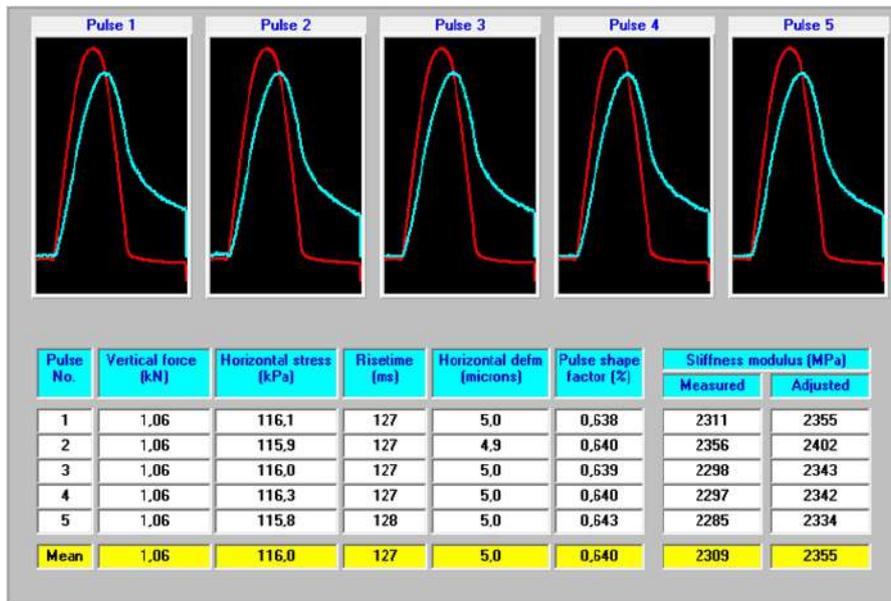
El desempeño del pavimento bajo el módulo resiliente lo hace comportar como una mezcla de nivel tolerable, pero este valor ingresa ajustadamente en el umbral del valor de 2500 MPa que pertenece a esta exigencia.

Al analizar el escenario A, hace notar que las mezclas con esqueleto granular que se encuentran entre la línea máxima de densidad y la línea bajo la zona restringida no presentan un comportamiento satisfactorio en función de módulo de rigidez.

- **Resultados diseño B:** Se indican en las figuras 55 y 56.

Figura 55

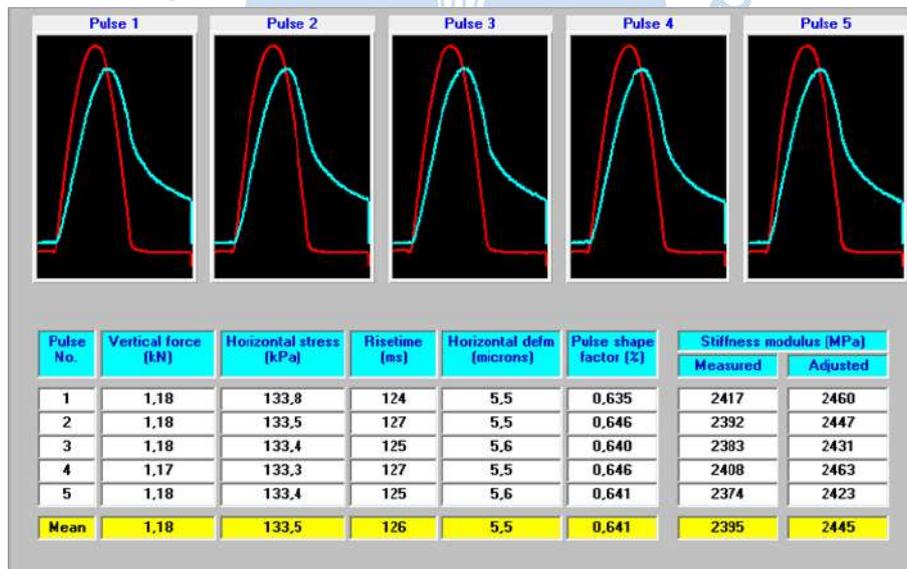
Prueba de módulo de rigidez para el diseño B, probeta # 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56

Prueba de módulo de rigidez para el diseño B, probeta # 2.



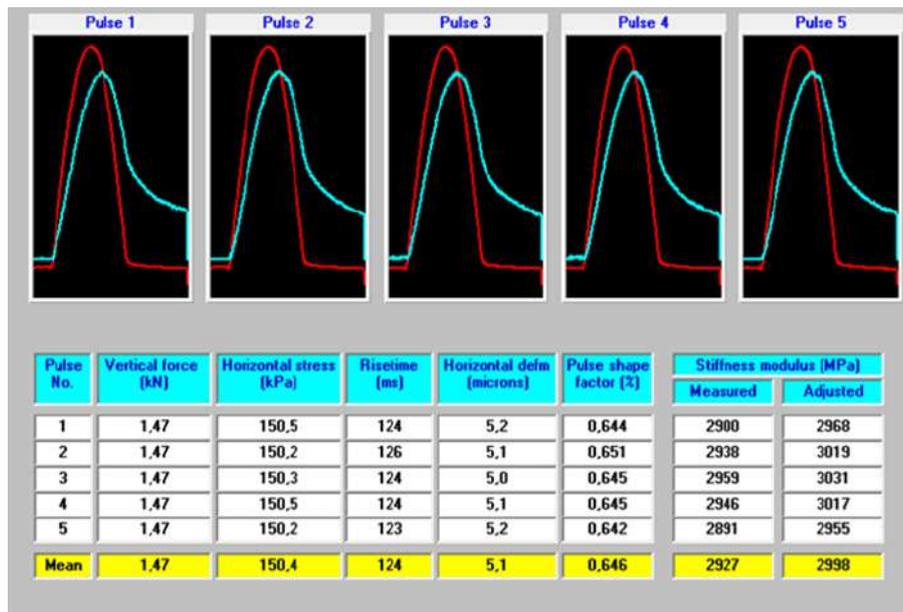
Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio del módulo de rigidez para el escenario B es 2400 MPa y se aleja del comportamiento tolerable a pertenecer a un nivel de mezcla inadecuada en la exigencia para pavimentos bajo módulo de rigidez. También en este diseño cumple con todos los parámetros volumétricos con respecto a la metodología Marshall y determina que si la gráfica granulométrica de diseño de pavimento flexible se aleja más por la parte baja de la zona restringida tiende a disminuir su rigidez.

- **Resultados del diseño C:** Se presentan en las figuras: 57 y 58.

Figura 57

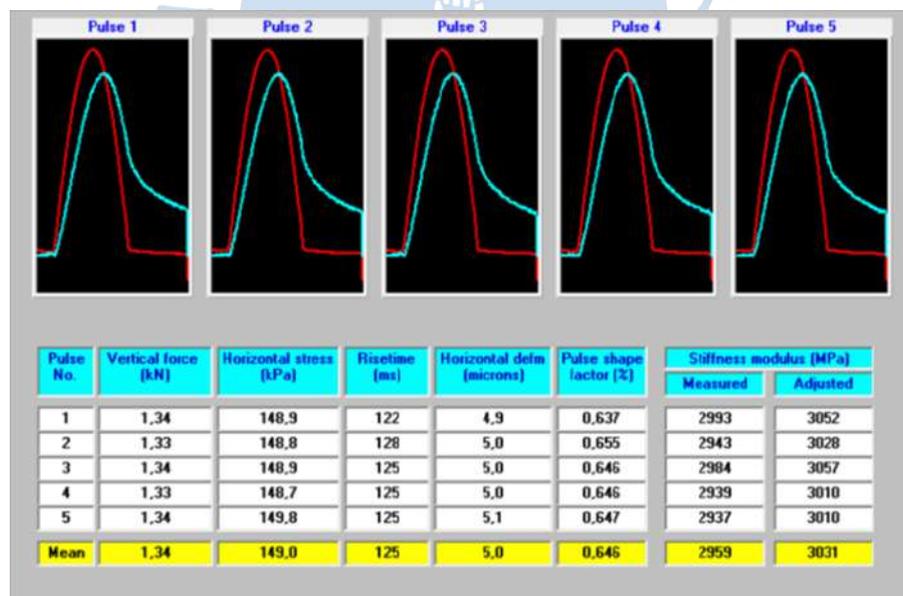
Prueba de módulo de rigidez para el diseño C, probeta # 1.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 58

Prueba de módulo de rigidez para el diseño C, probeta # 2.



Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio obtenido para módulo resiliente del escenario C es 3015 MPa cumplen la exigencia a un nivel de mezcla tolerable e ingresa ligeramente a un pavimento de comportamiento satisfactorio, esto indica que la graduación propuesta en el diseño C se desarrolla al ingresar la curva granulométrica entre la zona restringida y termina por la parte superior de la línea de máxima densidad.

Al utilizar este esqueleto granular permite innovar el diseño de estructuras flexibles debido a que dicho entorno granulométrico no se utiliza en la planta de asfalto del Municipio de Loja y la estructura granular para diseños locales no ofrecen buenos resultados bajo la exigencia de valores de módulos de rigidez, como lo indican las figuras 49, 50, 51 y 52 a pesar de que cumplen parámetros volumétricos de la metodología Marshall.

4.5. Comparación granulometrías y módulos de rigidez para los diseños estudiados

Con la granulométrica y los valores de los módulos de rigidez tanto para las mezclas recién producidas en la planta de asfalto de la ciudad de Loja como los nuevos diseños propuestos (A, B, C) permiten valorar el desempeño del pavimento flexible y los posibles deterioros que se producirían antes de la vida útil del pavimento, como también establecer rangos que nos proporcionen ayuda para realizar correcciones oportunas cuando se elaboren diseños en la localidad. Es por ello, en la tabla 32 y figura 59, se presentan la estructura granular y módulos de cada uno de los diseños estudiados para efectuar un análisis detallado.

Tabla 32

Módulos de rigidez de los diseños evaluados.

Diseños	Contenido de asfalto (%)	Módulos de rigidez promedio MPa	Nivel de desempeño	Exigencias
Bacheo	5,90	1400,00	Mezclas inadecuadas	Mezclas satisfactorias 3000 a 4000 MPa
Vía	5,46	2140,00	Mezclas inadecuadas	Mezclas tolerables: 2500 a 3000 MPa y
A	5,60	2450,00	Mezclas tolerables	4000 a 5000 MPa
B	5,50	2400,00	Mezclas inadecuadas	Mezclas inadecuadas: menores a 2500 MPa
C	5,90	3015,00	Mezclas tolerables	o mayores a 5000 MPa

Fuente: Elaboración propia

El conjunto de información obtenida de todos los diseños permite hacer observaciones por cada uno de los aspectos que conforman la mezcla asfáltica y evaluar su comportamiento para proponer correctivos oportunos por esta situación se presenta a continuación algunos comentarios y discusiones que ayudarían a mejorar la utilización de estructura granular para diseños realizados en la ciudad de Loja.

- Como se puede observar en la en la figura 59 y tabla 32, el esqueleto granular del diseño C ofrece un alto valor de módulo de rigidez a nivel satisfactorio. En cambio, la graduación del escenario elaborado en la ciudad Loja (tendido en vía) se presenta con una exigencia de nivel inadecuado, pero con valores de módulo superiores referente al diseño por bacheo a pesar de tener limitantes en cumplir ciertos aspectos como: angularidad del árido fino, deletéreos y azul de metileno. Los diseños propuestos (A, B) como también el diseño elaborado en la localidad por bacheo ofrecen valores muy bajos de módulo de rigidez, a pesar de cumplir aspectos volumétricos (método Marshall). Lo que permite deducir que el rango aceptable para ofrecer un buen comportamiento granular se encuentra entre el entorno granulométrico de diseño C y ligeramente hacia arriba de la línea máxima de densidad. Estos límites se ajustarían mejor si se realizan más variaciones granulares cumpliendo los requisitos de agregado mineral, tanto para pruebas de consenso como de origen en diseños elaborados en la ciudad de Loja.
- Así mismo, utilizar como estructura de agregado al diseño por bacheo como límite máximo superior, puesto que valores superiores a este esqueleto granular producen mezclas mucho más finas (menores tamiz N°4), lo que puede repercutir en la expulsión de finos bajo condiciones sumergidas y provocar mezclas más susceptibles a fisuramientos más aún en la ciudad de Loja que se encuentra en una zona de lluvia constante. Por otro lado, la gráfica de este diseño se encuentra fuera de los límites de los puntos de control superior del método Superpave para un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ pulgada, que genera una disminución en porción de materiales retenido de $\frac{1}{2}$ pulgada provocando un deficiente potencial en la densificación de la mezcla, al no disponer de suficiente tamaño máximo y buena distribución de tamaños inferiores.
- Descripción de los diseños A y B: El entorno granulométrico para el escenario A, se ubica entre la zona de restricción, pero bajo la línea de máxima densidad y termina por parte superior de esta línea; en cambio el escenario B, la gráfica se ubica por la parte baja fuera de la zona de restricción y termina por la superior de la línea de máxima densidad. Para estos casos el comportamiento del módulo de rigidez disminuye conforme el esqueleto granular se aleja por la parte baja de la esta restricción, limitando el uso de estos diseños como límites inferiores, más aún cuando las exigencias proponen que mezclas menores a 2500 MPa presentan un nivel de despeño inadecuado; como también, define que mezclas al encontrarse en este rango son susceptibles a ahuellamiento como se explicó en el capítulo 2 (deformaciones permanentes) situación que se presenta en este tipo de estructuras granulares.
- En cambio, para la granulometría del diseño C, la ubicación de esta gráfica inicia desde abajo en medio y se forman por la parte superior del área restringida para terminar por

la parte superior de la línea de máxima densidad. Este tipo de estructura ofrecen módulos altos mayores de 3000 MPa comportándose a un nivel de mezcla satisfactorio, lo que hace notar que estructuras granulares que ingresan a la zona restringida ofrecen un buen desempeño del pavimento.

- De acuerdo a los resultados obtenidos, las mezclas con el entorno granulométrico A y con tendencia hacia debajo de la zona restringida tienen una estructura granular más gruesa. Así mismo con el análisis del valor del módulo de rigidez indicaron ser más vulnerables a fallas por ahuellamiento. Por tanto, permanece abierta la posibilidad de plantear un intervalo de granulometrías, donde el límite inferior se ubicará en el escenario A, ya que graduaciones ligeramente hacia bajo de este diseño al ser implementadas en las HMA son susceptibles a fallas por roderas. En cambio, como límite superior el diseño por bacheo, pero disminuyendo los porcentajes en la serie superior al tamiz N°4; se toma esta estructura con el propósito de evadir esqueletos granulares vulnerables a deterioros cuando son sometidos al acondicionamiento en el agua, pero cumpliendo requisitos del agregado mineral bajo la metodología Superpave.
- Al analizar la información respecto a esqueletos granulares, parámetros volumétricos y módulos de rigidez para la elaborar diseños en la ciudad de Loja, se sugiere utilizar un rango de contenidos de asfalto entre 5,6 y 6,0 %, puesto que rangos superiores o inferiores a estos valores las mezclas son propensas a deformaciones permanentes, como también impiden poseer una densificación adecuada de la mezcla y sobre todo cumplir características granulares según especificaciones del sistema Superpave.
- Referente a la angularidad de los minerales (caras fracturadas), es necesario tomar en cuenta los requisitos que presenta la normativa del método Superpave, ya que las características de la forma de la partícula, angularidad y textura de agregados gruesos pueden ser usadas en la predicción del comportamiento de los pavimentos en fisuraciones debido a fatiga y ahuellamiento. En cambio, al no hacer un control del agregado fino, el comportamiento de las HMA se manifiesta en términos de rodera, es decir una alta angularidad (método Superpave) ofrece mayor resistencia a deformación permanente en los firmes flexibles.

4.6. Comportamiento de la sensibilidad a la humedad

Este ensayo permite evaluar a las HMA al desprendimiento que sufre el agregado mineral del asfalto, dicho método desarrollado ayuda a identificar si la combinación entre ligante y el esqueleto granular es vulnerable al acondicionamiento de la mezcla en el agua, como también sirve para valorar la efectividad de los aditivos utilizados. En la Tala 33, se muestran los resultados realizados al diseño C.

Tabla 33

Valores de la prueba de susceptibilidad a la humedad para mezclas del diseño C.

Agregados	Materiales				Testigo	Estabilidad (Lbs)					
	Porcentaje de pétreos	Porcentaje de dosificación	Pes. Específico del mineral (gr)	Pes. específico 25°C ligante		Diámetro en mm	Espesor mm	Espesor mm 24h en agua 60°	Carga (N)	Resistencia a la tensión	%TSR
3/4"	15	15	2,71		1	102,60	50,40		3770	464,13	
1/2"	22	22	2,67		2	102,00	50,70		3730	459,18	
3/8" lavado	41	41	2,61		3	102,60	52,60		3890	458,88	
Arena	14	14	2,62		4	102,80	54,50	5,62	3275	372,14	80,87
Filler	8	8	2,33		5	101,50	58,10	5,92	3190	344,37	
C.A.					6	102,40	48,80	4,91	3150	401,30	
TOTAL	100	100	2,61	1,02							

Elaborado: Elaboración propia.

La susceptibilidad a la humedad se evalúa para el diseño propuesto C, el cual proporciona un valor de resistencia a la tensión indirecta (TSR) de 81%; dicho parámetro es superior a 80% del especificado, pero ingresa ajustado al cumplimiento de este límite. El comportamiento de la mezcla en esta prueba puede tener relación con el módulo de rigidez, ya que este valor está en el umbral de mezclas a nivel satisfactorio (3015 MPa) o también por que la mezcla para el escenario C no posee valores altos del ensayo de angularidad del agregado fino (39%)



Conclusiones

Las conclusiones de mayor importancia deducidas en la presente investigación se detallan a continuación.

Respecto a diseños elaborados en la planta de asfalto del Municipio de Loja:

Se determina que las HMA no cumplen los ensayos de azul de metileno, deletéreos y angularidad de agregado fino para el sistema Superpave que impiden el cumplimiento de características volumétricas provocando fallas por ahuellamiento.

Al determinar la estructura granular se comprueba que la gráfica se desarrolla sobre la zona restringida del criterio Superpave y que posee una excesiva cantidad de agregado fino redondeado propenso a formar daños prematuros por humedad inducido por la pérdida de fricción interna y cohesión de los agregados.

Se demuestra que los diseños de las HMA que se producen actualmente en la planta de asfalto del Municipio de Loja no son adecuados, porque presentan problemas de desempeño tanto para la estructura granular, características del agregado como propiedades volumétricas y por lo tanto deben modificarse para cumplir exigencias reales de la zona.

En la evaluación por desempeño bajo módulos de rigidez por el Equipo NAT, las HMA recién producidas en planta se encuentra en un nivel de comportamiento inadecuado, debido a que sus valores se encuentran por debajo de 2200 MPa y para este rango de módulo los pavimentos son susceptibles a deformaciones permanentes.

Respecto a diseños propuestos en mezclas asfálticas en caliente:

Al implementar exigencias de control del agregado mineral bajo el sistema Superpave, se mejora notablemente el desempeño de las HMA con respecto al valor del módulo de rigidez.

Las mezclas de diseño A, B y C, cumplen con el esqueleto granular y los parámetros volumétricos establecidos por las especificaciones ecuatorianas y bajo la tecnología Marshall.

Los escenarios A y B propuestos, obedecen a un desempeño de nivel tolerable a pesar de que sus valores están en el umbral del comportamiento inadecuado, menores o iguales a 2500 MPa y con este parámetro los pavimentos flexibles son propensos a falla por deformación permanente.

La estructura granular del escenario C, se encuentra a un nivel de exigencia satisfactorio ya que el módulo de rigidez es superior a 3000 MPa.

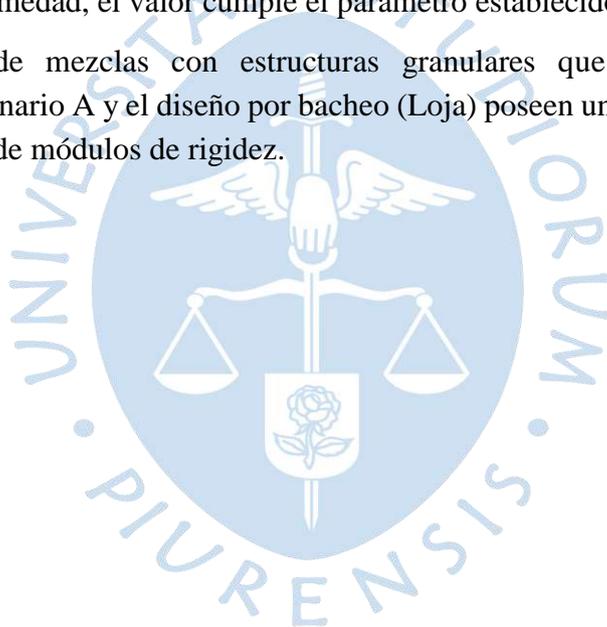
Se verifica que el aporte del sistema Superpave a la innovación de las HMA para la planta de asfalto del Municipio de Loja ha permitido diseñar la estructura granular C, en la cual constan mejoras respecto a las características del agregado mineral y distribución de los tamaños del esqueleto granular, proporcionando parámetros volumétricos adecuados; así mismo, cumple con la exigencia de comportamiento a nivel satisfactorio referente al módulo de rigidez, lo que permite implementar este tipo de mezcla asfáltica eficiente en la localidad.

Se evidencia que las estructuras granulares que atraviesan la zona restringida ofrecen valores altos de módulo de rigidez de las HMA, respecto a las granulometrías que ubican bajo dicha zona.

La investigación determina un rango de ligante entre 5,60 y 6,0% respecto a un entorno granulométrico ideal de las HMA a nivel satisfactorio, ya que valores superiores o inferiores a estos rangos, las mezclas son propensas a deformaciones permanentes.

Se demuestra que al evaluar la mezcla asfáltica en el diseño C con el ensayo de susceptibilidad a la humedad, el valor cumple el parámetro establecido.

Los diseños de mezclas con estructuras granulares que se localicen entre la granulometría del escenario A y el diseño por bacheo (Loja) poseen un comportamiento a nivel tolerable bajo control de módulos de rigidez.



Recomendaciones

En la planta de elaboración de pavimento flexible del Municipio de Loja, debe hacerse constantemente calibraciones con la finalidad de evitar la colocación de porcentajes inapropiados respecto a la estructura granular y porcentaje de ligante.

Someter las mezclas recién producidas en planta a un envejecimiento al horno a 135 °C por una hora antes de preparar las briquetas, con la finalidad de simular el tiempo que ocurre hasta colocarla mezcla en obra.

Emplear en todas las HMA, la prueba de módulo de rigidez ya que nos permite realizar controles de obra y corregir diseños hasta obtener una mezcla a nivel satisfactorio, puesto que al evaluar las HMA solo con parámetros volumétricos respecto a especificaciones ecuatorianas no garantiza un desempeño adecuado.

Elaborar diseños de mezclas con estructuras granulares que se localicen entre la granulometría del escenario A y el diseño para bacheo (Loja) hasta obtener módulo de rigidez altos, con la finalidad de afinar tanto el esqueleto granular como el rango del ligante.

Hacer una correlación entre el módulo de rigidez (nivel satisfactorio) respecto de estabilidad y flujo para las HMA en cada zona del país, de tal manera que nos permita tener información de parámetros volumétricos para control de calidad (método Marshall), puesto que es el más económico y utilizado.



Lista de referencias

AASHTO T 313-12. (2016). Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR). *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 15.

AASHTO T 315-12. (2001). Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). *ASTM Interanational*, 3(August), 1–16.

AASHTO T 96. (2015). Standard method of test for resistance to degradation of smallsize coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles machine. *AASHTO International*, 1–11. <http://www.techstreet.com/products/1866875>

AASHTO T53. (2001). *Standard Method of Test for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus) Softening Point of Asphalt Binder (Ring and Ball Apparatus)* (p. 4).

AASHTO T 104. (2010). Department of Transportation Method of Test for the Soundness of Aggregates By Use of Sodium Sulfate. *AASHTO International*, August, 1–7.

AASHTO T 11. (2018). Sieve Analysis In Mineral Aggregate by Washing. *American Association State Highway and Transportation.*, 11(October), 1–40.

AASHTO T 27. (2018). Sieve Analysis Of Fine And Coarse Aggregates. *American Association State Highway and Transportation.*, 11(October), 1–40.

AMAAC RA-05. (2010). *Determinación del valor de azul de metileno para material que pasa la malla número 200 (75 μ m)*. 1–8.

Aranda, J. (2017). *Evaluación de la susceptibilidad al daño por humedad de mezclas asfálticas en caliente utilizando ensayo TSR*.

ASTM C 142. (2014). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates. *United States: American Society for Testing and Material.*, 1–2.

ASTM C1252. (2020). Standard Test Method for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading. *ASTM International*, 1–4.

ASTM C127. (2014). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of coarse aggregate. *ASTM International*.

ASTM C128. (2014). Standard test method for relative density (specific gravity) and absorption of fine aggregate. *ASTM International*.

ASTM D 113-07. (2002). Standard Test Method for Ductility of bituminous materials. *Annual Book of American Society for Testing Materials ASTM Standards, 03*, 6–8.

ASTM D 2872. (2004). Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). *ASTM International, C*, 1–6.

ASTM D 3381-92. (1999). *Standard Specification for Penetration-Graded Asphalt Cement for Use in Pavement* (Vol. 04, Issue Reapproved, pp. 1–2).

ASTM D 5821. (2014). Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. *ASTM International*, 1–5.

ASTM D 6521. (2000). Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)1. *ASTM International, i*(April), 1–6.

ASTM D2419. (2002). Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate 1. *ASTM International, 04*, 2–11.

ASTM D3515. (2010). *Standard Specification for Hot-Mixed, Hot-Laid Bituminous Paving Mixtures*.

ASTM D3625-96. (2001). *Standard Practice for Effect of Water on Bituminous-Coated Aggregate Using*. 1–3.

ASTM D4791. (2019). Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. *ASTM International, i*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/D4791-10.2>

ASTM D75. (2014). Standard Method of Test for Sampling of Aggregates Standard Practice for. *ASTM International, 91*, 1–6.

Botasso, G., Fensel, E., & Rebollo, O. (2017). Desempeño de Mezclas Asfálticas Densas Frente al Ahuellamiento Considerando Diferentes Exigencias en los Entonos Granulométricos. *Congreso Iberio -Latinoamericano Del Asfalto, Medellin*, 12.

Brown, F., & Pell, P. S. (1974). *Repeated Loading of Bituminous Materials*". CAPSA 74. National Institute for Road Research, Republic of South Africa, Durban. 1974.

CEN-EN 13108-1. (2008). Bituminous Mixtures – Material Specifications. *European Committee of Standardization*.

CEN. (2001). Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalts. In *European Committee of Standardization*.

Chimborazo, W. (2012). *Diseño de Mezclas Asfálticas Mediante el Método SUPERPAVE*.

Chowdhury, A., Button, J., & Grau, J. (2001). *Effects of Superpave restricted zone on permanent deformation*. May, 136.

Cooper, K. E. (2002). Operation & Maintenance Manual. United Kingdom. *Cooper Research Technology Limited*.

Cooper, K. E., Brown, S. F., & Pooley, G. R. (1985). *The Design of Aggregate Gradings for Asphalt Basecourses. Proceedings, The Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 54. 54, 1985.*

Corona, C. (2017). *Universidad Técnica Federico Santa María Determinación De Módulo De Rigidez Y Caracterización De Módulo Dinámico De Mezcla Superpave.* <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/14002/3560900231445UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Delgadillo, R., Arteaga, L., Wahr, C., & García, G. (2017). Comparación de Metodologías de Zonificación Superpave para Chile. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 11).

Delgado, H., Garnica, P., Villatoro, G., & Rodríguez, G. (2006). *INFLUENCIA DE LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS DE LA MEZCLA ASFÁLTICA.* 299, 112.

Delgado, J. (2011). *Guía para la realización de ensayos y clasificación de asfaltos, emulsiones asfálticas y asfaltos rebajados según el Reglamento Técnico Centroamericano (RTCA 75.01.22:047).*

Figueroa, A., & Reyes, A. (2017). Relación entre la Energía de Activación y el MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY para los Asfaltos Oxidados por Agua. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 10).

FM 1-T 283. (2018). *Florida Method of Test for RESISTANCE OF COMPACTED BITUMINOUS MIXTURE TO MOISTURE-INDUCED DAMAGE.* 1–7.

Gálvez, M. (2018). *Expedientes Técnicos de la Ciudad de Loja.*

García, J., & Hansen, K. (2002). *Guía de para seleccionar tipo de Mezcla Asfáltica en Caliente HMA para Pavimentos. Manual elaborado por National Asphalt Pavement Association and Federal Highways Administration.* (p. 189).

García, L., Miró, R., & Pérez, F. (2017). Efecto del tipo de ligante bituminoso y del grado de envejecimiento de la mezcla en su resistencia a la fisuración. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin.*

Garnica, P., Delgado, H., José, A., Gómez, A., Sergio, L., Romero, A., Alonso, H., & Orta, A. (2004). *ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS_a.*

Garnica, P., Delgado, H., & Sandoval, C. (2005). *Análisis comparativo de los métodos de Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas_b.* 271, 62. <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt271.pdf>

Garnica, P., Flores, M., & Delgado, H. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas_a.* 267, 119.

Gualpa, G. (2017). *Evaluación de la influencia del espesor de una carpeta asfáltica porosa, en la infiltración del agua superficial de una vía.*

I.N.V. E – 757 – 07. (2000). *EFEECTO DEL AGUA SOBRE MEZCLAS ASFÁLTICAS SUELTAS (MÉTODO RÁPIDO DE CAMPO).* 3–5.

INEN 2515. (2010). NTE INEN 2515 Enmienda 1. PRODUCTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO. CEMENTO ASFÁLTICO (CLASIFICACIÓN POR VISCOSIDAD) REQUISITOS. *Servicio Ecuatoriano de Normalización.*

Kandhal, P., & Cooley, A. (2002). Evaluation of Permanent Deformation of Asphalt Paving Mixtures Using Loaded Wheel Tester. *The Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, Asphalt Paving Technology*, 71(October), 16.

Kandhal, P., & Mallick, R. (2001). *Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense-Gra ... Effect of Mix Gradation on Rutting Potential of Dense-Gra ... 1767.*

Kandhal, P., & Parker, F. (1998). Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements. In *Transportation Research Record* (Issue 1638, pp. 85–93). <https://doi.org/10.3141/1638-10>

Kandhal, P. S., Khatri, M. A., & Motter, J. B. (1992). Evaluation of particle shape and texture of mineral aggregates and their blends. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, 61(92), 217–240.

León, A., & Villao, A. (2017). *Caracterización Reológica Avanzada de Asfaltos.*

León, A., Villao, A., Jaramillo, J., & Vila, R. (2017). Caracterización Reológica de Asfaltos Empleados en Ecuador. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 12).

McDaniel, R. S. (2007). Current Superpave Mix Design Practice. *Transportation Research Circular Number E-C 124.*, 2–11.

McGennis, R., Shuler, S., & Bahia, H. (1994). ANTECEDENTES de los MÉTODOS de ENSAYO de LIGANTES ASFÁLTICO de SUPERPAVE, *The Asphalt Institute, Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA), National Asphalt Training Center (NATC).* 89.

Minaya, S., & Ordoñez, A. (2003). Superpave y el diseño de mezclas asfálticas. *Universidad Nacional de Ingeniería.*

Montesinos, C., & Reyes, P. (2010). *Comparación de Módulos de Rigidez por Tensión Indirecta Utilizando Método de Compactación Marshall y Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas.* (Issue 2005).

MOP-001-F. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES.*

Morea, F. (2011). *Deformaciones permanentes en mezclas asfálticas. Efecto de la reología de los asfaltos, la temperatura y las condiciones de carga.*

NCAT. (2009). Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction. In *National Center for Asphalt Technology. Third Edition, Auburn University.*

NEVI-12-MTOP. (2013). *VOLUMEN N° 3 ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES.*

Paladines, S. (2013). *Vulnerabilidad a nivel municipal del cantón Loja.*

Rivera, J., Rebollo, O., & Fensel, E. (2017). Correlación entre pendiente de Ahuellamiento en el ensayo de WHEEL TRACKING TEX y la Curva de Carga Versus Deformación del Ensayo Marshall. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 10).

Romero, F., Delgado, H., Ayala del Toro, Y., & Garnica, P. (2017). Control de Calidad de la Deformación Permanete de Mezclas Asfálticas bajo diferentes Variables de Construcción. In *Congreso Iberio -latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 12).

Segovia, A. (2014). *Predicción de las deformaciones plásticas permanentes de mezclasasfálticas en caliente correlacionando determinaciones de rigidez del ligante y ensayos dinámicos de carga.*

Vázquez, C. G., Aguiar, J. P., Smit, A. de F., & Prozzi, J. A. (2009). Laboratory Evaluation of Influence of Operational Tolerance (Acceptance Criterion) on Performance of Hot_Mix Asphalt Concrete. *Center for Transportation Research at The University of Texas at Austin*, 7(2), 106.

Vila, R., & García, G. (2015). *PROPUESTA DE EXIGENCIAS EN LA EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS CON EQUIPO NOTTINGHAM ASPHALT MIX TESTER PROPOSAL OF REQUIREMENTS IN PERFORMANCE QUALITY OF ASPHALT MIXTURES WITH EQUIPMENT NOTTINGHAM ASPHALT MIX TESTER.*

Vila, R., García, G., Jaramillo, J., & Troya, H. (2017). Estudio del Asfalto Ecuatoriano a Temperaturas Intermedias con laTecnología Superpave. *Congreso Iberio -Latinoamericano Del Asfalto, Medellin*, 11.

Vintimilla, A. (2014). *ANÁLISIS DE FACTORES CLIMÁTICOS EN LAS DIFERENTES REGIONES DEL ECUADOR PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.*

Wahr, C., Delgadillo, R., Araya, L., & Bravo, M. (2017). Primera Construcción en Chile de Mezcla con Diseño Superpave y Ensayos de Desempeño. In *Congreso Iberio - latinoamericano del Asfalto, Medellin* (p. 12).

Zúñiga, A., Zúñiga, B., Freire, V., & Ortiz, P. (2013). Determinación de la efectividad entre mezclas porosas o filtrantes fabricadas con cemento portland y mezclas porosas elaboradas con cemento asfáltico. *Universidad Técnica Particular de Loja.*



Apéndices



Apéndice A. Prueba del peso específico de arena lavada y agregado de 3/4"

LOCALZ: MINA ZAMORA	MUESTRA : Arena Y 3/4" (Lavada)
SITIO: STOCK	NORMA: ASTM + STOCK
ENSAYO DE PESO ESPECIFICO	
PESO ESPECIFICO DE ARENA LA VADA	
DATOS:	
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	621.89 gr
PESO PICNOMETRO:	121.30 gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	500.59 cc
PESO TOTAL:	930.72 gr
PESO SUELO SECO:	490.22 gr
DENSIDAD MASIVA:	2.56 gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2.615 gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2.70 gr/cm ³
ABSORCION:	2.00%
PESO ESPECIFICO DE 3/4"	
DATOS:	
PESO EN EL AIRE:	2870.00 gr
PESO SUMERGIDO:	1810.00 gr
PESO SECO:	2839.27 gr
DENSIDAD MASIVA:	2.68 gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2.708 gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2.759 gr/cm ³
ABSORCION:	1.08%

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice B. Prueba del peso específico de los minerales de 3/8" - 1/2"

LOCALZ : MINA ZAMORA SITIO STOCK	MUESTRA : 3/8" Y 1/2" NORMA: ASTM C-128 ; ASTM C-127
ENSAYO DE PESO ESPECÍFICO	
PESO ESPECÍF. DE 3/8"	
DATOS :	
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	621,89 gr
PESO PICNOMETRO:	121,30 gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	500,59 cc
PESO TOTAL:	923,95 gr
PESO SUELO SECO:	478,26 gr
DENSIDAD MASIVA:	2,42 gr-cm ³
DENSIDAD SSS:	2,53 gr-cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2,71 gr-cm ³
ABSORCION:	5%
PESO ESPECÍF. 1/2"	
DATOS :	
PES. AIRE:	3075 gr
PES. SUMERGIDO:	1925 gr
PES. SECO:	3030 gr
DENSIDAD MASIVA:	2,63 gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2,67 gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2,74 gr/cm ³
ABSORCION:	1,49%
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ ELABORADO POR:	

Apéndice C. Ensayo de peso específico de los agregados 3/8" y 1/2" (Lavado)

LOCALZ: MINA ZAMORA	MUESTRA : 3/8" Y 1/2"
SITIO.: STOCK	NORMA: ASTM C-128 ; ASTM C-127
ENSAYO DE PESO ESPECIFICO	
PESO ESPECIFICO DE 3/8" - LAVADO	
DATOS :	
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	656,88 gr
PESO PICNOMETRO:	156,12 gr
VOLUMEN PICNOMETRO:	500,76 cc
PESO TOTAL:	964,91 gr
PESO SUELO SECO:	488,16 gr
DENSIDAD MASIVA:	2,54 gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2,60 gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2,71 gr/cm ³
ABSORCION:	2,43%
PESO ESPECIFICO DE 1/2"	
DATOS :	
PES AIRE:	3075 gr.
PES. SUMERGIDO:	1925 gr.
PES. SECO:	3030 gr.
DENSIDAD MASIVA:	2,63 gr/cm ³
DENSIDAD SSS:	2,67 gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE:	2,74 gr/cm ³
ABSORCION:	1,49%

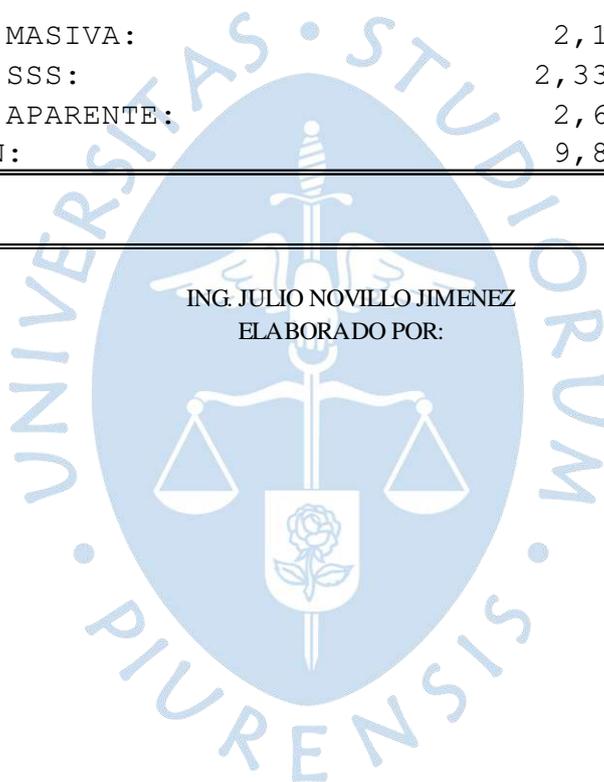
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice D. Ensayo de peso específico para el Filler

LOCALZ : MINA ZAMORA	MUESTRA : FILLER
SITIO : STOCK	NORMA: ASTM C-128

PESO ESPECIFICO DEL FILLER.		
DATOS :		
PESO PICNOMETRO MAS AGUA :	625,10	gr
PESO PICNOMETRO :	121,30	gr
VOLUMEN PICNOMETRO :	503,80	cc
PESO TOTAL :	910,72	gr
PESO SUELO SECO :	455,05	gr
DENSIDAD MASIVA :	2,12	gr/cm ³
DENSIDAD SSS :	2,332	gr/cm ³
DENSIDAD APARENTE :	2,69	gr/cm ³
ABSORCION :	9,88%	

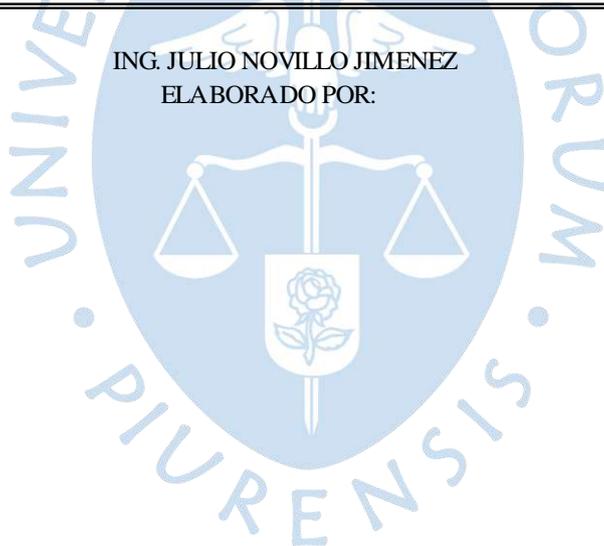
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice E. Ensayo para obtener el porcentaje de partículas alargadas (3/4")

LOCALZ.: MINA ZAMORA	MUESTRA : 3/4"																																						
PROFUND.: STOCK	NORMA ASTM D 4791																																						
ENSAYO DE PORCENTAJE PARA PARTÍCULAS ALARGADAS																																							
<table border="1"> <thead> <tr> <th>TAMIZ RETENIDO</th> <th>PESO MATERIAL (gr)</th> <th>PESO PARTÍCULAS ALARGADAS (gr)</th> <th>PORCENTAJE DE PARTÍCUL. ALARGAD.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2 plg</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1 1/2 plg</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1 plg</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>3/4 plg</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1/2 plg</td> <td>2000,07</td> <td>80,58</td> <td>4,03%</td> </tr> <tr> <td>3/8 plg</td> <td>1000,53</td> <td>84,85</td> <td>8,48%</td> </tr> <tr> <td>SUMA=</td> <td>3000,60</td> <td>165,43</td> <td>5,51%</td> </tr> <tr> <td>ESPECIFICACIÓN</td> <td>10%</td> <td></td> <td>ACEPTABLE</td> </tr> </tbody> </table>				TAMIZ RETENIDO	PESO MATERIAL (gr)	PESO PARTÍCULAS ALARGADAS (gr)	PORCENTAJE DE PARTÍCUL. ALARGAD.	2 plg				1 1/2 plg				1 plg				3/4 plg				1/2 plg	2000,07	80,58	4,03%	3/8 plg	1000,53	84,85	8,48%	SUMA=	3000,60	165,43	5,51%	ESPECIFICACIÓN	10%		ACEPTABLE
TAMIZ RETENIDO	PESO MATERIAL (gr)	PESO PARTÍCULAS ALARGADAS (gr)	PORCENTAJE DE PARTÍCUL. ALARGAD.																																				
2 plg																																							
1 1/2 plg																																							
1 plg																																							
3/4 plg																																							
1/2 plg	2000,07	80,58	4,03%																																				
3/8 plg	1000,53	84,85	8,48%																																				
SUMA=	3000,60	165,43	5,51%																																				
ESPECIFICACIÓN	10%		ACEPTABLE																																				

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice F. Ensayo para obtener el porcentaje de partículas alargadas (1/2")

LOCALZ.:	ZAMORA	MUESTRA :	1/2"
SITIO :	STOCK	NORMA ASTM D 4791	
ENSAYO DE PORCENTAJE PARA PARTÍCULAS ALARGADAS			
TAMIZ RETENIDO	PESO (gr)	PESO PARTÍCUL. ALARGAD. (gr)	PORCENTAJE DE PARTÍCUL. ALARGAD.
2 plg			
1 1/2 plg			
1 plg			
3/4 plg			
1/2 plg	1000,20	24,69	2,47%
3/8 plg	1000,20	24,69	2,47%
SUMA=	2000,40	49,38	2,47%
ESPECIFICACIÓN	10%		ACEPTABLE

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

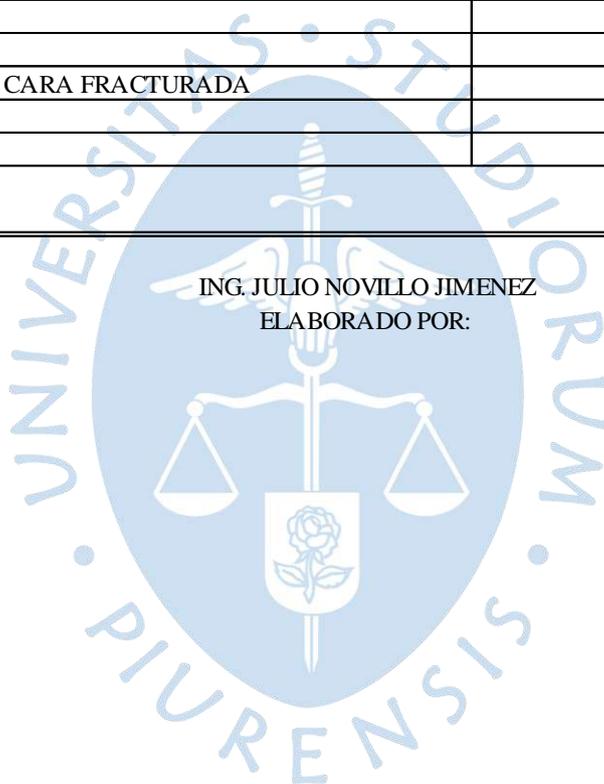
ELABORADO POR:



Apéndice G. Ensayo para obtener el porcentaje de caras fracturadas (3/4")

LOCALZ: MINA ZAMORA PROFUND: STOCK	MUESTRA : Agregado '3/4" NORMA ASTM D5821																								
ENSAYO DE CARAS FRACTURADAS																									
<table border="1"> <tr> <td>TAMAYO NOMINAL</td> <td>3/4"</td> </tr> <tr> <td>MASA DE LA MUESTR.</td> <td>1500,15</td> </tr> <tr> <td>TAM. RETENID.</td> <td>#4</td> </tr> <tr> <td>MASA MÍN. UNA CARA FRACTURAD.</td> <td>1417,63</td> </tr> <tr> <td>MASA MÍN. DOS CARAS FRACTURAD.</td> <td>146,57</td> </tr> <tr> <td>MASA PARTÍCULAS OBSERVADAS</td> <td>63,48</td> </tr> <tr> <td>% MÍN. UNA CARA FRACTURAD.</td> <td>96,62%</td> </tr> <tr> <td>ESPECIF.</td> <td>85%</td> </tr> <tr> <td>CUMPLE</td> <td>SI</td> </tr> <tr> <td>% MINIMO 2 CARA FRACTURADA</td> <td>11,89%</td> </tr> <tr> <td>ESPECIF.</td> <td>80 %</td> </tr> <tr> <td>CUMPLE</td> <td>SI</td> </tr> </table>		TAMAYO NOMINAL	3/4"	MASA DE LA MUESTR.	1500,15	TAM. RETENID.	#4	MASA MÍN. UNA CARA FRACTURAD.	1417,63	MASA MÍN. DOS CARAS FRACTURAD.	146,57	MASA PARTÍCULAS OBSERVADAS	63,48	% MÍN. UNA CARA FRACTURAD.	96,62%	ESPECIF.	85%	CUMPLE	SI	% MINIMO 2 CARA FRACTURADA	11,89%	ESPECIF.	80 %	CUMPLE	SI
TAMAYO NOMINAL	3/4"																								
MASA DE LA MUESTR.	1500,15																								
TAM. RETENID.	#4																								
MASA MÍN. UNA CARA FRACTURAD.	1417,63																								
MASA MÍN. DOS CARAS FRACTURAD.	146,57																								
MASA PARTÍCULAS OBSERVADAS	63,48																								
% MÍN. UNA CARA FRACTURAD.	96,62%																								
ESPECIF.	85%																								
CUMPLE	SI																								
% MINIMO 2 CARA FRACTURADA	11,89%																								
ESPECIF.	80 %																								
CUMPLE	SI																								

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice H. Ensayo para obtener el porcentaje de deletéreos (1/2" y arena)

LOCALZ:	MINA ZAMORA	MUESTRA :	Agregados 1/2" Y ARENA
PROFUND.:	STOCK	NORMA:	ASTM C 142
ENSAYO PARA OBTENER EL PORCENTAJE DE DELETÉREOS			
AGREGADO GRUESO			
TAM. RETENIDO	PESO (gr)	PESO MUESTRA LA VADA	% DELETÉR.
1 1/2"	0,00	0,00	-
3/4"	0,00	0,00	-
3/8"	1000,03	8,64	0,86%
Nº 4	0,00	0,00	-
SUMA=	1000,03	8,64	0,86%
ESPECIFICACIÓN	1%		ACEPTABLE
AGREGADO FINO - ARENA			
TAMIZ RET.	PESO (gr)	PESO MUESTRA LA VADA	% DELETÉREOS
#16	25,00	0,23	0,92%
ESPECIFICACIÓN	1%		ACEPTABLE

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice I. Ensayo para obtener el porcentaje de deletéreos (3/4" y 3/8")

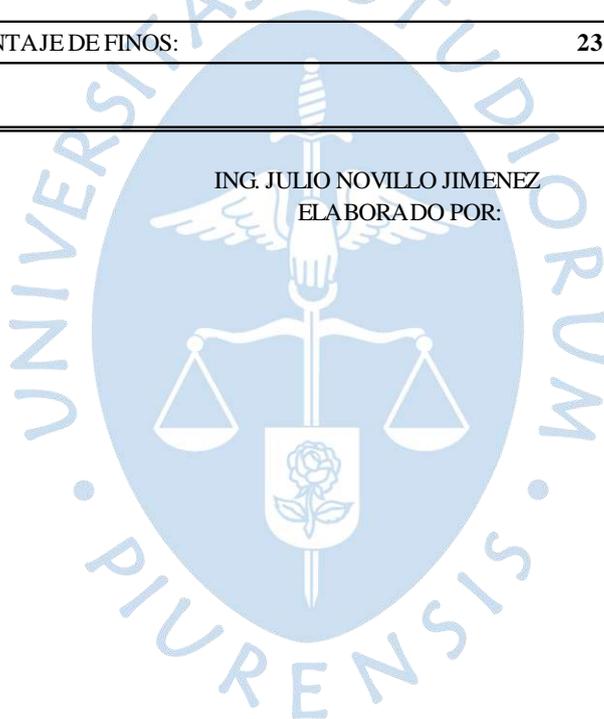
LOCALZ:	MINA ZAMORA	MUESTRA :	Agregado 3/4" y 3/8"
SITIO :	STOCK	NORMA:	ASTM C 142
ENSAYO DE DETERMINACIÓN DE DELETÉREOS			
AGREGADO GRUESO			
TAMZ. RETENIDO	PESO (gr)	PESO MUESTR. LAVADA	% DELETÉR.
1 1/2"	0,00	0,00	-
3/4"	2000,00	9,38	0,47%
3/8"	1000,03	7,15	0,71%
Nº 4	0,00	0,00	-
SUMA=	3000,03	16,53	0,55%
ESPECIFICACIÓN	1%		ACEPTABLE
AGREGADO FINO - 3/8"			
TAMIZ RET.	PESO (gr)	PESO MUESTR. LAVADA	% DELETÉR.
#16	25,00	0,20	0,80%
ESPECIFICACIÓN	1%		ACEPTABLE

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice J. Ensayo para obtener el porcentaje de equivalente de arena (3/8" triturado)

LOCALIZACION: ZAMORA	MUESTRA: Agregado '3/8" Triturado																																
SITIO: STOCK	NORMA : ASTM D-2419																																
PORCENTAJE DE FINOS																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>EXP. No.</th> <th>LECTURA ARENA</th> <th>LECTURA ARCILLA</th> <th>E. A PARCIAL</th> </tr> <tr> <td></td> <td>cc.</td> <td>cc.</td> <td>%</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>690</td> <td>900</td> <td>76,7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>545</td> <td>710</td> <td>76,8</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>595</td> <td>780</td> <td>76,3</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">VALOR MEDIO:</td> <td>76,6</td> </tr> <tr> <td>ESPECIFICACIÓN</td> <td>50%</td> <td></td> <td>ACEPTABLE</td> </tr> </tbody> </table>		EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL		cc.	cc.	%	1	690	900	76,7	2	545	710	76,8	3	595	780	76,3	4				VALOR MEDIO:			76,6	ESPECIFICACIÓN	50%		ACEPTABLE
EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL																														
	cc.	cc.	%																														
1	690	900	76,7																														
2	545	710	76,8																														
3	595	780	76,3																														
4																																	
VALOR MEDIO:			76,6																														
ESPECIFICACIÓN	50%		ACEPTABLE																														
<table border="1"> <tr> <td>PROCENTAJE DE FINOS:</td> <td style="text-align: right;">23,4 %</td> </tr> </table>		PROCENTAJE DE FINOS:	23,4 %																														
PROCENTAJE DE FINOS:	23,4 %																																

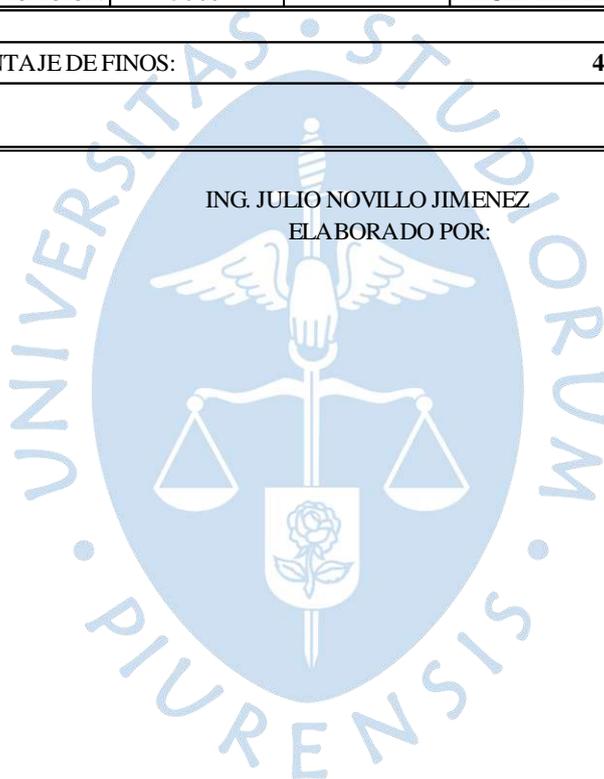
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice K. Ensayo para obtener el porcentaje de equivalente de arena (Arena)

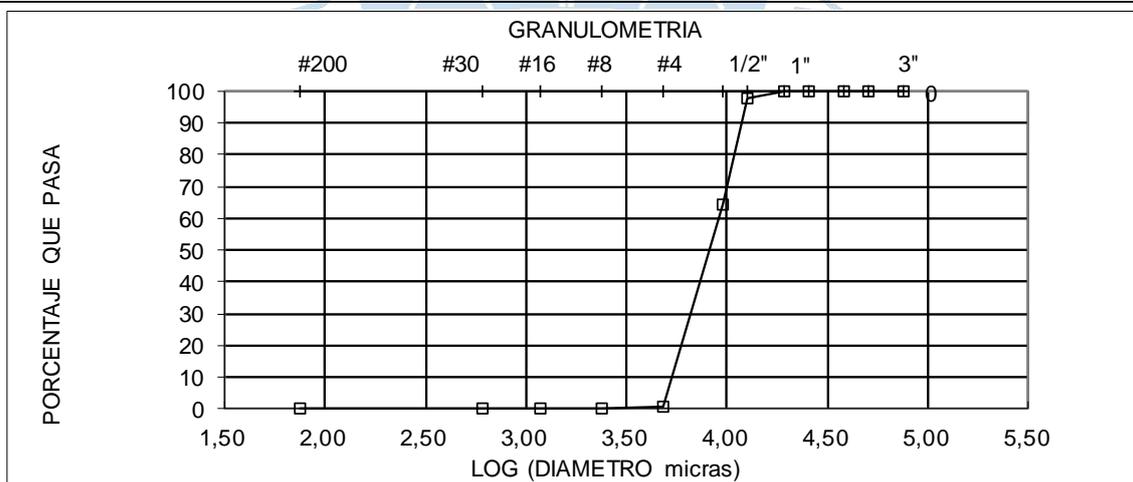
LOCALIZACION: ZAMORA	MUESTRA: ARENA																																
SITIO: STOCK	NORMA : ASTM D-2419																																
PORCENTAJE DE FINOS																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>EXP. No.</th> <th>LECTURA ARENA</th> <th>LECTURA ARCILLA</th> <th>E. A PARCIAL</th> </tr> <tr> <td></td> <td>cc.</td> <td>cc.</td> <td>%</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>565</td> <td>585</td> <td>96,6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>545</td> <td>570</td> <td>95,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>570</td> <td>600</td> <td>95,0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="3">VALOR MEDIO:</td> <td>95,7</td> </tr> <tr> <td>ESPECIFICACIÓN</td> <td>50%</td> <td></td> <td>ACEPTABLE</td> </tr> </tbody> </table>		EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL		cc.	cc.	%	1	565	585	96,6	2	545	570	95,6	3	570	600	95,0	4				VALOR MEDIO:			95,7	ESPECIFICACIÓN	50%		ACEPTABLE
EXP. No.	LECTURA ARENA	LECTURA ARCILLA	E. A PARCIAL																														
	cc.	cc.	%																														
1	565	585	96,6																														
2	545	570	95,6																														
3	570	600	95,0																														
4																																	
VALOR MEDIO:			95,7																														
ESPECIFICACIÓN	50%		ACEPTABLE																														
<table border="1"> <tr> <td>PROCENTAJE DE FINOS:</td> <td style="text-align: right;">4,3 %</td> </tr> </table>		PROCENTAJE DE FINOS:	4,3 %																														
PROCENTAJE DE FINOS:	4,3 %																																

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice L. Ensayo granulométrico para el agregado de 1/2"

LOCALIZACION: ZAMORA		MUESTRA: Agregado '1/2"				
PESO IN.: 3.000,00		PROFUND.: STOCK				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
MALLA No.	MAS. RETEN. PARC.	MAS. RETEN. ACUM.	PORCENTAJ. RETEN.	PORCENTAJ. PAS.	% PAS. CORREGID.	PORCENTAJ. RETEN.
3 plg	0	0	0	100	100	0
2 plg	0	0	0	100	100	0
1 1/2 plg	0	0	0	100	100	0
1 plg	0	0	0	100	100	0
3/4 plg	0	0	0	100	100	0
1/2 plg	63,59	63,59	2,12	97,88	97,88	2,12
3/8 plg	1.005,47	1.069,06	35,64	64,36	64,36	35,64
# 4	1.912,55	2.981,61	99,39	0,61	0,61	99,39
PASA # 4	18,39	18,39	0,61			
SUM.	3.000	3.000	100			
PES. HUMED=	18,4	w2 % =	0,00	PES. SEC.=	18	
# 8	16,63	16,63	90,43	9,57	0,06	99,94
# 16	0,43	17,06	92,77	7,23	0,04	99,96
# 30	0,07	17,13	93,15	6,85	0,04	99,96
# 50	0,12	17,25	93,80	6,20	0,04	99,96
# 100	0,22	17,47	95,00	5,00	0,03	99,97
# 200	0,47	17,94	97,55	2,45	0,02	99,99
PASA #200	0,45	0,45	2,45			
SUMAN	18,39	18,39	100,00			



ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice M. Ensayo granulométrico para el agregado de 3/4"

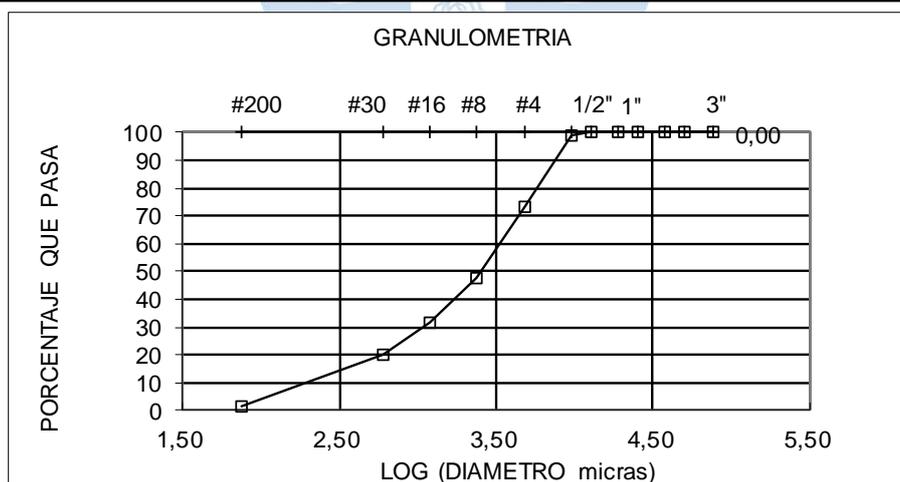
LOCALIZACION: ZAMORA		MUESTRA: Agregado 3/4"				
PESO IN.: 2.415,00		SITIO.: STOCK				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
MALLA No.	MAS. RETEN. PARCIAL	MAS. RETEN. ACUMUL.	PORCEN. RETEN.	PORCEN. PAS.	% PAS. CORREGID.	PORCEN. RETEN.
3 plg	0	0	0	100	100	0
2 plg	0	0	0	100	100	0
1 1/2 plg	0	0	0	100	100	0
1 plg	0	0	0	100	100	0
3/4 plg	31,93	31,93	1,32	98,68	98,68	1,32
1/2 plg	957,78	989,71	40,98	59,02	59,02	40,98
3/8 plg	972,87	1.962,58	81,27	18,73	18,73	81,27
# 4	443,02	2.405,60	99,61	0,39	0,39	99,61
PASA # 4	9,40	9,40	0,39			
SUMAN	2.415	2.415	100,00			
PESO HUM=	9,4	w% =	0,00	P.SECCO=	9	
# 8	5,14	5,14	54,70	45,30	0,18	99,82
# 16	0,64	5,78	61,51	38,49	0,15	99,85
# 30	0,62	6,40	68,11	31,89	0,12	99,88
# 50	0,27	6,67	70,98	29,02	0,11	99,89
# 100	0,16	6,83	72,68	27,32	0,11	99,89
# 200	0,35	7,18	76,41	23,59	0,09	99,91
PASA #200	2,22	2,22	23,59			
SUMAN	9,40	9,40	100,00			

GRANULOMETRIA

LOG (DIAMETRO micras)	PORCENTAJE QUE PASA
1,50	0
2,50	0
3,50	0
3,75	20
4,00	60
4,25	100
4,50	100
5,50	100

Apéndice N. Ensayo granulométrico para el agregado de 3/8" lavado

LOCALIZACION: ZAMORA		MUESTRA: Agregado 3/8" Lavado				
PESO IN.: 1.307,79		SITIO: STOCK				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
MALLA No.	MAS RETEN. PARCIAL	MASA RET. ACUMUL.	PORCENT. RETEN.	PORCENT. PAS.	% PAS. CORREGID.	PORCENT. RETEN.
3 plg				100	100	
2 plg				100	100	
1 1/2 plg				100	100	
1 plg				100	100	
3/4 plg				100	100	
1/2 plg				100	100	
3/8 plg	14,51	14,51	1,11	98,89	98,89	1,11
# 4	336,53	351,04	26,84	73,16	73,16	26,84
PASA # 4	956,75	956,75	73,16			
SUMAN	1.308	1.308	100,00			
PESO HUM=	956,8	w% =	0,00	P.SECCO=	957	
# 8	335,95	335,95	35,11	64,89	47,47	52,53
# 16	207,23	543,18	56,77	43,23	31,62	68,38
# 30	151,97	695,15	72,66	27,34	20,00	80,00
# 50	119,69	814,84	85,17	14,83	10,85	89,15
# 100	81,01	895,85	93,63	6,37	4,66	95,34
# 200	41,00	936,85	97,92	2,08	1,52	98,48
PASA #200	19,90	19,90	2,08			
SUMAN	956,75	956,75	100,00			



ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice O. Ensayo granulométrico para el agregado de arena lavada

LOCALIZACION: ZAMORA		MUESTRA: ARENA Lavada				
PESO IN.: 1.215,54		SITIO: STOCK				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
MALLA No.	MASA RET. PARCIAL	MAS. RETEN. ACUMUL.	PORCENT. RETEN.	PORCENT. PAS.	% PAS. CORREGID.	PORCENT. RETEN.
3 plg				100	100	
2 plg				100	100	
1 1/2 plg				100	100	
1 plg				100	100	
3/4 plg				100	100	
1/2 plg				100	100	
3/8 plg	30,59	30,59	2,52	97,48	97,48	2,52
# 4	146,09	176,68	14,54	85,46	85,46	14,54
PASA # 4	1.038,86	1.038,86	85,46			
SUMAN	1.216	1.216	100,00			
PESO HUM=	1038,9	w1 % =	0,00	P.SECA=	1039	
# 8	229,22	229,22	22,06	77,94	66,61	33,39
# 16	234,74	463,96	44,66	55,34	47,30	52,70
# 30	265,92	729,88	70,26	29,74	25,42	74,58
# 50	170,42	900,30	86,66	13,34	11,40	88,60
# 100	81,66	981,96	94,52	5,48	4,68	95,32
# 200	33,10	1015,06	97,71	2,29	1,96	98,04
PASA #200	23,80	23,80	2,29			
SUMAN	1038,86	1038,86	100,00			

GRANULOMETRIA

The graph plots the percentage of sand passing through various sieve sizes against the logarithm of the sieve diameter in microns. The sieve sizes are indicated at the top: #200, #30, #16, #8, #4, 1/2", 1", and 3". The curve shows that approximately 2% of the sand passes through a #200 sieve, and 100% passes through a #4 sieve.

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice P. Ensayo granulométrico para el Filler

LOCALIZACION: ZAMORA		MUESTRA: FILLER				
PESO IN.: 215,26		SITIO: STOCK				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
MALLA No.	MAS. RETEN. PARCIAL	MASA RET. ACUMUL.	PORCEN. RETEN.	PORCEN. PAS.	% PAS. CORREGID.	PORCEN. RETEN.
3 plg				100	100	
2 plg				100	100	
1 1/2 plg				100	100	
1 plg				100	100	
3/4 plg				100	100	
1/2 plg				100	100	
3/8 plg				100	100	
TAMIZ # 4				100	100	
PAS. TAMIZ # 4	215,26	215,26	100			
SUMA	215	215	100			
PES. HUMED=	215,3	w1 (%)=	0	PESO .SEC. =	215	
# 8	0	0	0	100	100	0
# 16	0	0	0	100	100	0
# 30	0	0	0	100	100	0
# 50	0	0	0	100	100	0
# 100	0	0	0	100	100	0
# 200	114,69	114,69	53,28	46,72	46,72	53,28
PASA #200	100,57	100,57	46,72			
SUMAN	215,26	215,26	100,00			

GRANULOMETRIA

Y-axis: PORCENTAJE QUE PASA (0 to 100)
X-axis: LOG (DIAMETRO micras) (1,50 to 5,50)

Sieve sizes marked: #200, #30, #16, #8, #4, 1/2", 1", 3"

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice Q. Ensayo de angularidad del agregado fino para arena sin lavar

LOCALIZACION:	MINA ZAMORA	MUESTRA:	Arena sin lavar
NORMA:	ASTM C 1253-98 o AASHTO T304-96 (2004)	SITIO:	STOCK

ENSAYO DE ANGULARIDAD DE LA ARENA			
-----------------------------------	--	--	--

CALIBRACIÓN DE CILINDRO			
Wc=	232,56 gr.	Temperatura=	19,70 °C
Wc+Wvidrio=	324,97 gr.	Dh2O=	998,25 Kg/m ³
Wc+Wvidrio+Wh2O=	424,32 gr.	M=	99,35 gr
V=	99,52 ml.		

ENSAYO DE ANGULARIDAD MÉTODO A				
#	F1+Wc	F	Gravedad específica	Ur= porcentaje de huecos en agregado
	gr	gr	gr/m ³	%
1,00	397,98	165,42	2,41	31,03
2,00	397,87	165,31	2,41	31,08
3,00	397,87	165,31	2,41	31,08
			PROMEDIO	31 %

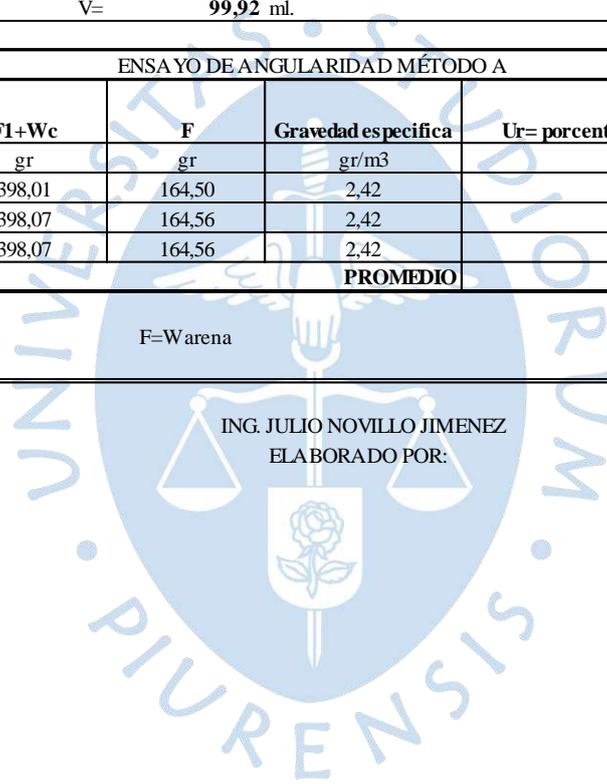
F1=Wcilindro + Warel F=Warena

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice R. Ensayo de angularidad del agregado fino para arena lavada

LOCALIZACION:	MINA ZAMORA	MUESTRA:	Arena lavada	
NORMA:	ASTM C 1252-98 o AASHTO T304-96 (2004)	SITIO:	STOCK	
ENSAYO DE ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO				
CALIBRACIÓN DE CILINDRO				
Wc=	233,51 gr.	Temperatura=	19,70 °C	
Wc+Wvidrio=	325,75 gr.	Dh2O=	998,25 Kg/m ³	
Wc+Wvidrio+Wh2O=	425,50 gr.	M=	99,75 gr	
V=	99,92 ml.			
ENSAYO DE ANGULARIDAD MÉTODO A				
#	F1+Wc	F	Gravedad específica	Ur= porcentaje de huecos en agregado
	gr	gr	gr/m ³	%
1,00	398,01	164,50	2,42	31,97
2,00	398,07	164,56	2,42	31,95
3,00	398,07	164,56	2,42	31,95
			PROMEDIO	32 %
F1=Wcilindro + Warena		F=Warena		

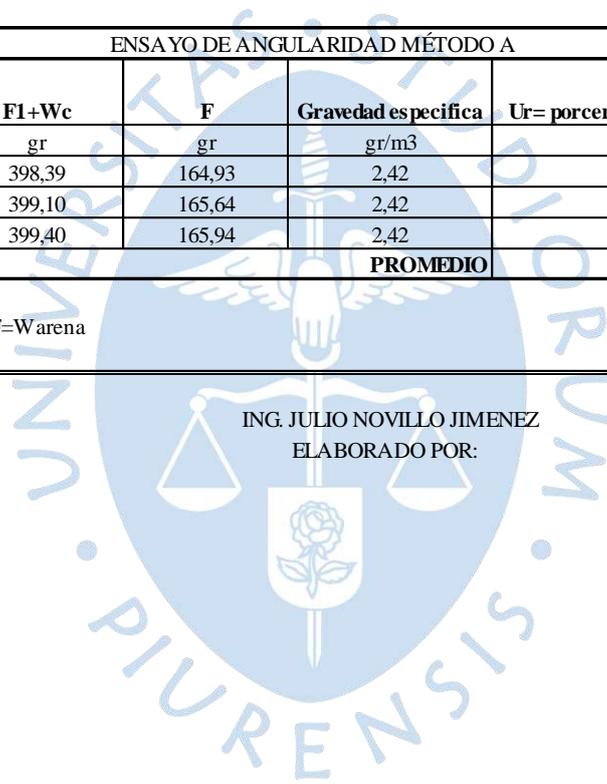
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice S. Ensayo de angularidad del agregado fino para material de 3/8" sin lavar

LOCALIZACIÓN: MINA ZAMORA	MUESTRA: 3/8" sin lavar			
NORMA: ASTM C 1253-98 o AASHTO T304-96 (2004)	SITIO: STOCK			
ENSAYO DE ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO				
CALIBRACIÓN DE CILINDRO				
Wc= 233,46 gr.	Temperatura= 19,70 °C			
Wc+W vidrio= 325,97 gr.	Dh2O= 998,25 Kg/m³			
Wc+W vidrio+Wh2O= 427,89 gr.	M= 101,92 gr			
V= 102,10 ml.				
ENSAYO DE ANGULARIDAD MÉTODO A				
#	F1+Wc	F	Gravedad específica	Ur= porcentaje de huecos en agregado
	gr	gr	gr/m3	%
1,00	398,39	164,93	2,42	33,25
2,00	399,10	165,64	2,42	32,96
3,00	399,40	165,94	2,42	32,84
PROMEDIO				33 %
F1=Wcilindro + Ware1 F=Warena				

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice T. Ensayo de angularidad del agregado fino para material de 3/8" lavado

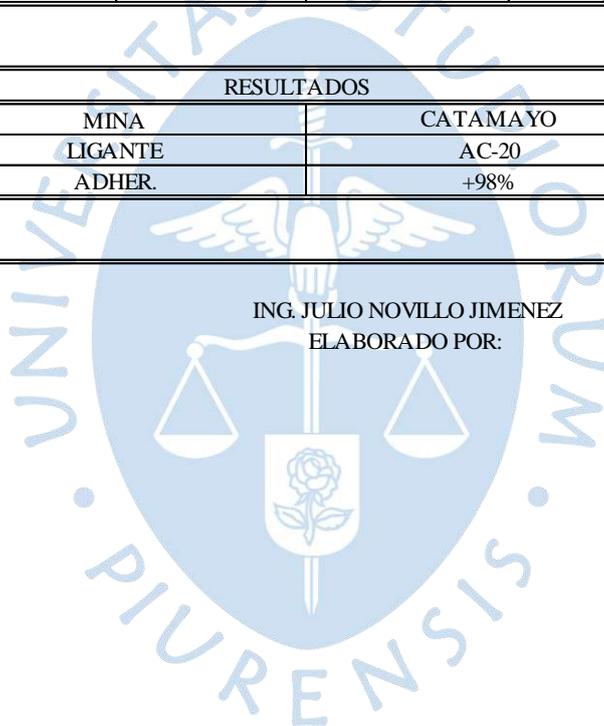
LOCALIZACION:	MINA ZAMORA	MUESTRA:	3/8" lavado	
NORMA:	ASTM C 1253-98 o AASHTO T304-96 (2004)	PROF:	STOCK	
ENSAYO DE ANGULARIDAD DEL AGREGADO FINO				
CALIBRACIÓN DE CILINDRO				
Wc=	233,46 gr.	Temperatura=	19,70 °C	
Wc+Wvidrio=	325,97 gr.	Dh2O=	998,25 Kg/m ³	
Wc+Wvidrio+Wh2O=	427,89 gr.	M=	101,92 gr	
V=	102,10 ml.			
ENSAYO DE ANGULARIDAD MÉTODO A				
#	F1+Wc	F	Gravedad específica	Ur= porcentaje de huecos en agregado
	gr	gr	gr/m ³	%
1,00	391,93	158,47	2,56	39,37
2,00	393,12	159,66	2,56	38,91
3,00	396,86	163,40	2,56	37,48
			PROMEDIO	39 %

F1=Wcilindro + Ware1 F=Warena

Apéndice U. Ensayo de Adherencia del Agregado de 3/4"

LOCALIZACION:	MINA ZAMORA		NORMA ASTM D 1664																		
MUESTRA :	3/4"		SITIO: STOCK																		
ENSAYO DE ADHERENCIA DE LOS MATERIALES BITUMINOSOS																					
<table border="1"> <tr> <td colspan="4" style="text-align: center;">ADHERENCIA DE MINERAL GRUESO</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">TAMZ.</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">MAS. (gr)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">TAMIZ PASA.</td> <td style="text-align: center;">TAMZ. RETEN.</td> <td style="text-align: center;">MUEST.</td> <td style="text-align: center;">ASFALTO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">3/8"</td> <td style="text-align: center;">1/4"</td> <td style="text-align: center;">100,02</td> <td style="text-align: center;">5,10</td> </tr> </table>						ADHERENCIA DE MINERAL GRUESO				TAMZ.		MAS. (gr)		TAMIZ PASA.	TAMZ. RETEN.	MUEST.	ASFALTO	3/8"	1/4"	100,02	5,10
ADHERENCIA DE MINERAL GRUESO																					
TAMZ.		MAS. (gr)																			
TAMIZ PASA.	TAMZ. RETEN.	MUEST.	ASFALTO																		
3/8"	1/4"	100,02	5,10																		
TIEMPOS Y TEMPERATURAS																					
MATERIAL BITUMINOSO	T° DE MEZCLA	TIEMP. DE MEZC.	TEMP ° DE CURADO	TIEMPO CURAD.	TIEMP. INMERS. EN AGUA																
CEMEN. ASFALT.	142 ± 3	2.0-3.0 min		No se aplica	16-18 hr.																
<table border="1"> <tr> <td colspan="2" style="text-align: center;">RESULTADOS</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">MINA</td> <td style="text-align: center;">CATAMAYO</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">LIGANTE</td> <td style="text-align: center;">AC-20</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">ADHER.</td> <td style="text-align: center;">+98%</td> </tr> </table>						RESULTADOS		MINA	CATAMAYO	LIGANTE	AC-20	ADHER.	+98%								
RESULTADOS																					
MINA	CATAMAYO																				
LIGANTE	AC-20																				
ADHER.	+98%																				

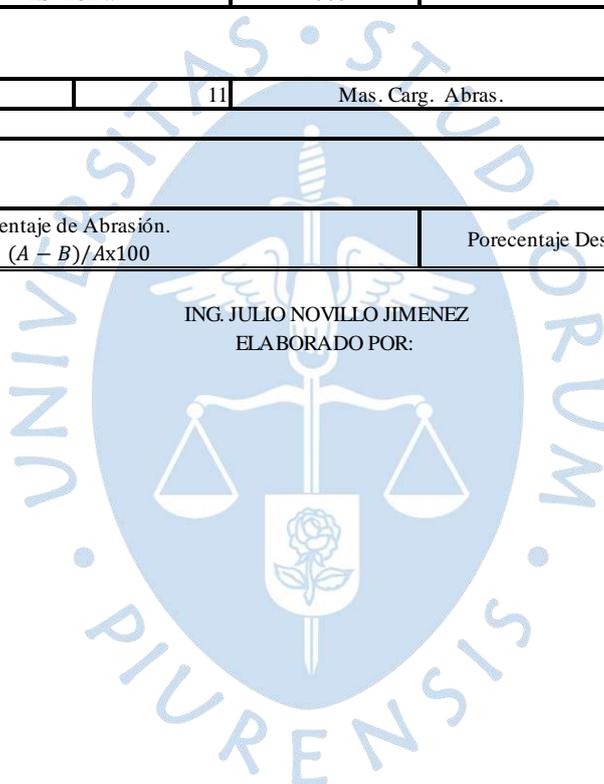
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice V. Ensayo de Abrasión

MUESTRA:	MINA ZAMORA	NORMA:	INEN 861
SITIO:	STOCK		
ENSAYO DE ABRASIÓN			
ENSAYO DE ABRASIÓN MÉTODO A			
TAMZ. PAS.	TAMZ. RETEN.	MAS.	MAS. FIN.
1 1/2 plg	1 plg	0,00	
1 plg	3/4 plg	0,00	
3/4 plg	1/2 plg	2.500,00	
1/2 plg	3/8 plg	2.501,90	
SUMA		5.001,90	3.960,00
ESPECIF.:		40%	ACCEPTABLE
Número de esferas:	11	Mas. Carg. Abras.	4.400,00 gr.
Porcentaje de Abras.:			21 %
Porcentaje de Abrasión. $V = (A - B)/Ax100$		Porcentaje Desagas. de Abrasión Máx (40%)	

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:



Apéndice W. Ensayo de azul de Metileno para el material 3/8" sin lavar

LOCALZ:	MINA ZAMORA	MUESTRA :	3/8" sin lavar
SITIO:	STOCK	NORMA	AMAAC RA-05
ENSAYO DE AZUL DE METILENO			
N° ENSAYOS	SOLUCION MB ml	PESO MUESTRA A (gr).	INDICE DE AZUL DE METILENO (mg/g)
1	0,50	1,00	0,50
2	1,00	1,00	1,00
3	1,50	1,00	1,50
4	2,00	1,00	2,00
5	2,50	1,00	2,50
6	3,00	1,00	3,00
7	3,50	1,00	3,50
8	4,00	1,00	4,00
9	4,50	1,00	4,50
10	5,00	1,00	5,00
11	5,50	1,00	5,50
12	6,00	1,00	6,00
13	6,50	1,00	6,50
14	7,00	1,00	7,00
15	7,50	1,00	7,50
16	8,00	1,00	8,00
17	8,50	1,00	8,50
18	9,00	1,00	9,00
19	9,50	1,00	9,50
20	10,00	1,00	10,00
21	10,50	1,00	10,50
22	11,00	1,00	11,00
23	11,50	1,00	11,50
24	12,00	1,00	12,00
25	12,50	1,00	12,50
26	13,00	1,00	13,00
INDICE	13	DESEMPEÑO	Problema de fallas

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice X. Ensayo de Azul de Metileno para el material 3/8" lavado

LOCALZ:	MINA ZAMORA	MUESTRA :	3/8" lavado
SITIO:	STOCK	NORMA	AMAAC RA-05
ENSAYO DE AZUL DE METILENO			
N° ENSAYOS	SOLUCION MB ml	PESO MUESTRA A (gr).	INDICE DE AZUL DE METILENO (mg/g)
1	0,50	1,00	0,50
2	1,00	1,00	1,00
3	1,50	1,00	1,50
4	2,00	1,00	2,00
5	2,50	1,00	2,50
6	3,00	1,00	3,00
7	3,50	1,00	3,50
8	4,00	1,00	4,00
9	4,50	1,00	4,50
10	5,00	1,00	5,00
11	5,50	1,00	5,50
12	6,00	1,00	6,00
13	6,50	1,00	6,50
14	7,00	1,00	7,00
15	7,50	1,00	7,50
INDICE	8	DESEMPEÑO	Acceptable

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ

ELABORADO POR:

Apéndice Y. Obtención de contenido de asfalto y granulometría de una mezcla en caliente elaborada en el Municipio de Loja para bacheo.

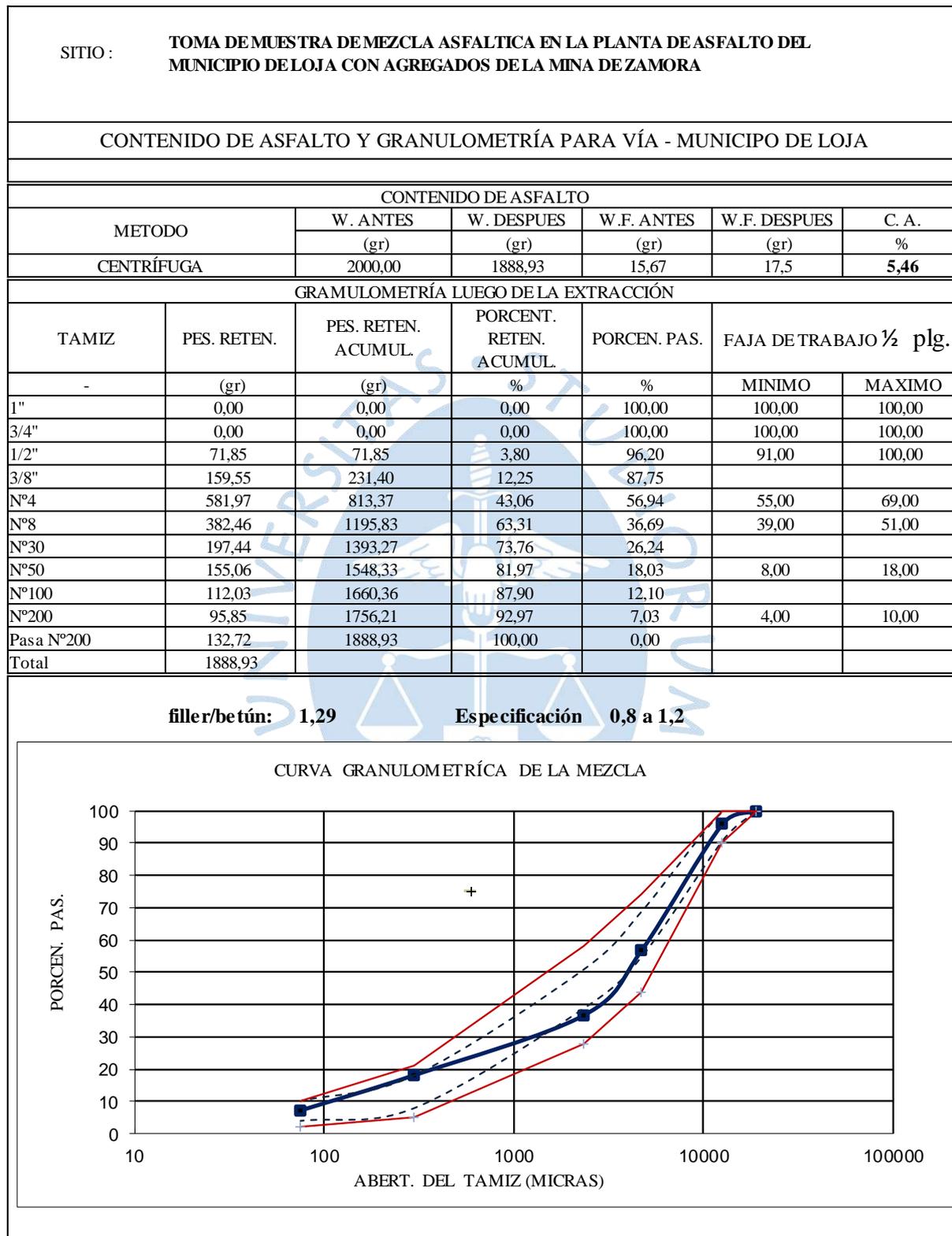
SITIO : TOMA DE MUESTRA DE MEZCLA ASFALTICA EN LA PLANTA DE ASFALTO DEL MUNICIPIO DE LOJA CON AGREGADOS DE LA MINA DE ZAMORA						
CONTENIDO DE ASFALTO Y GRANULOMETRÍA PARA BACHEO - MUNICIPIO DE LOJA						
CONTENIDO DE ASFALTO						
METODO	W. ANTES	W. DESPUES	W.F. ANTES	W.F. DESPUES	C. A.	
	(gr)	(gr)	(gr)	(gr)	%	
CENTRÍFUGA	2000,00	1880,00	15,34	17,43	5,90	
GRAMULOMETRÍA LUEGO DE LA EXTRACCIÓN						
TAMIZ	PES. RETEN.	PES. RETEN. ACUMUL.	PORCET. RETEN. ACUM.	PORCENT. PAS.	FAJA DE TRABAJO ½"	
-	(gr)	(gr)	%	%	MINIMO	MAXIMO
1"	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	0,00	0,00	0,00	100,00	91,00	100,00
3/8"	73,18	73,18	3,89	96,11		
N°4	489,00	562,18	29,90	70,10	55,00	69,00
N°8	361,63	923,81	49,14	50,86	39,00	51,00
N°30	495,43	1419,24	75,49	24,51		
N°50	179,55	1598,79	85,04	14,96	8,00	18,00
N°100	106,09	1704,88	90,69	9,31		
N°200	99,12	1804,00	95,96	4,04	4,00	10,00
Pasa N°200	76,00	1880,00	100,00	0,00		
Total	1880					

filler/betún: 0,69 Especificación 0,8 a 1,2

CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MEZCLA

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice Z. Obtención de contenido de asfalto y granulometría de una mezcla en caliente elaborada en el Municipio de Loja para tendido en vía.

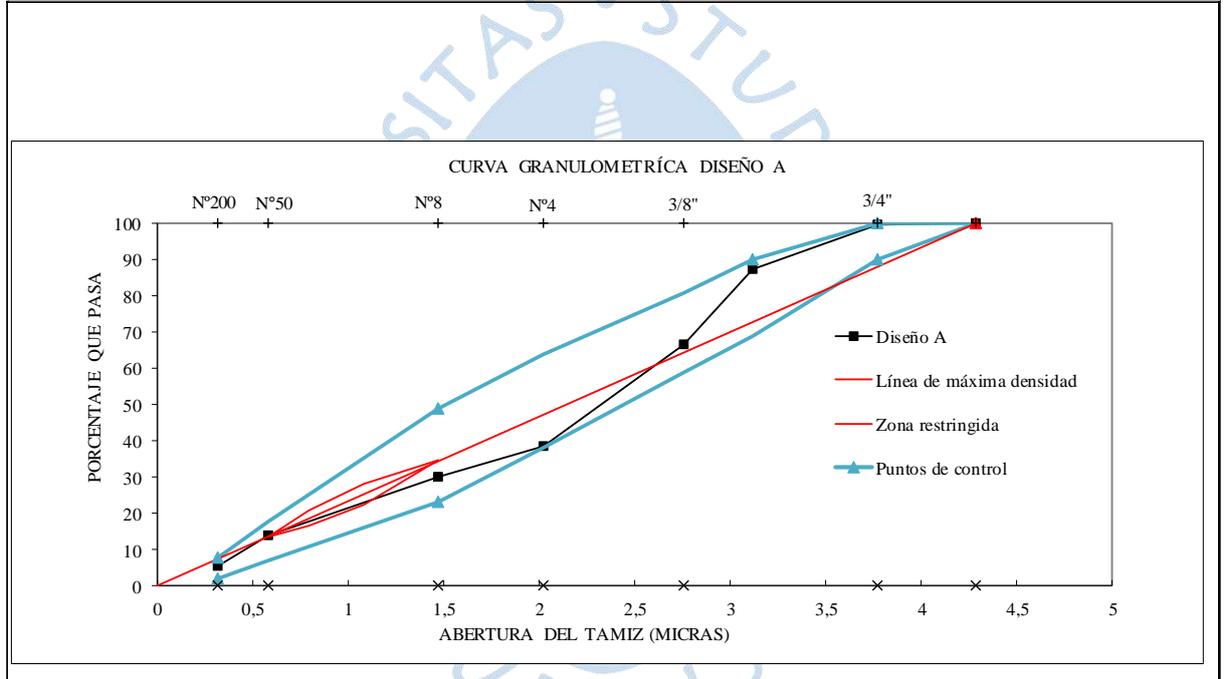


ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice AA. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño A

SITIO:	AGREGADOS DE LA MINA RAMSÉS	MUESTRA # 1:	3/4"
		MUESTRA # 2:	1/2"
		MUESTRA # 3:	3/8"
NORMA:	MEZCLA FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO	MUESTRA # 4:	ARENA
		MUESTRA # 5:	FILLER
GRANULOMETRÍA Y GRÁFICA PARA EL DISEÑO A			

TAMIZ	MUESTRAS % PASA					LÍMITES SUPERPAVE		MEZCLA	MEZCLA
	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	MÍNIMO	MÁXIMO	% PASA	% R.A.
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
3/4"	98,68	100,00	100,00	100,00	100,00	90,00	100,00	99,60	0,40
1/2"	59,02	97,88	100,00	100,00	100,00	69,00	90,00	87,20	12,80
3/8"	18,73	64,36	98,89	97,48	100,00	59,00	81,00	66,44	33,56
Nº4	0,39	0,61	73,16	85,46	100,00	38,00	64,00	38,57	61,43
Nº8	0,18	0,06	47,47	66,61	100,00	23,00	49,00	30,22	69,78
Nº50	0,11	0,04	10,85	11,40	100,00	7,00	18,00	14,04	85,96
Nº200	0,09	0,02	1,52	1,96	46,72	2,00	8,00	5,32	94,68



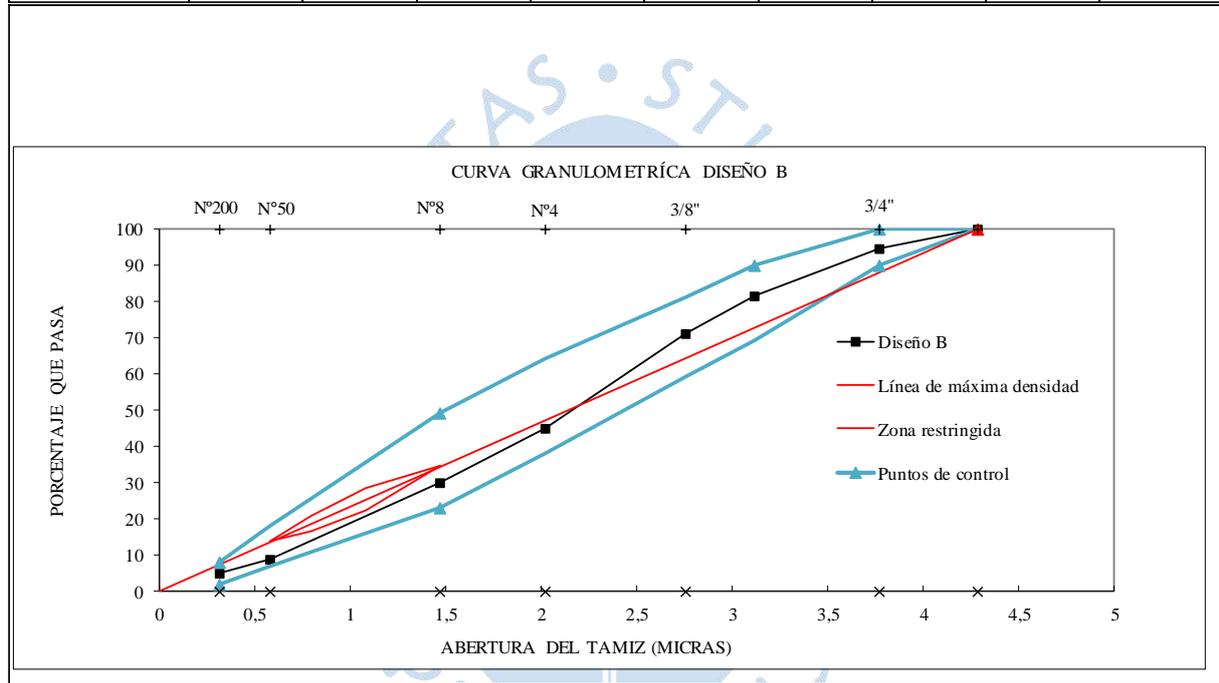
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice BB. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño B

SITIO:	AGREGADOS DE LA MINA RAMSÉS	MUEST. # 1:	3/4 plg
		MUEST. # 2:	1/2 plg
		MUEST. # 3:	3/8 plg
NORMA:	MEZC. FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO	MUEST. # 4:	ARENA
		MUEST. # 5:	FILLER

GRANULOMETRÍA DISEÑO B

TAMIZ Nº	MUESTRAS % PASA					LÍMITES SUPERPAVE		MEZCLA	MEZCLA
	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	MÍNIMO	MÁXIMO	% PASA	% R.A.
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
3/4"	98,68	100,00	100,00	100,00	100,00	90,00	100,00	94,55	5,45
1/2"	59,02	97,88	100,00	100,00	100,00	69,00	90,00	81,50	18,50
3/8"	18,73	64,36	98,89	97,48	100,00	59,00	81,00	70,99	29,01
Nº4	0,39	0,61	73,16	85,46	100,00	38,00	64,00	44,89	55,11
Nº8	0,18	0,06	47,47	66,61	100,00	23,00	49,00	29,87	70,13
Nº50	0,11	0,04	10,85	11,40	100,00	7,00	18,00	8,95	91,05
Nº200	0,09	0,02	1,52	1,96	46,72	2,00	8,00	5,15	94,85



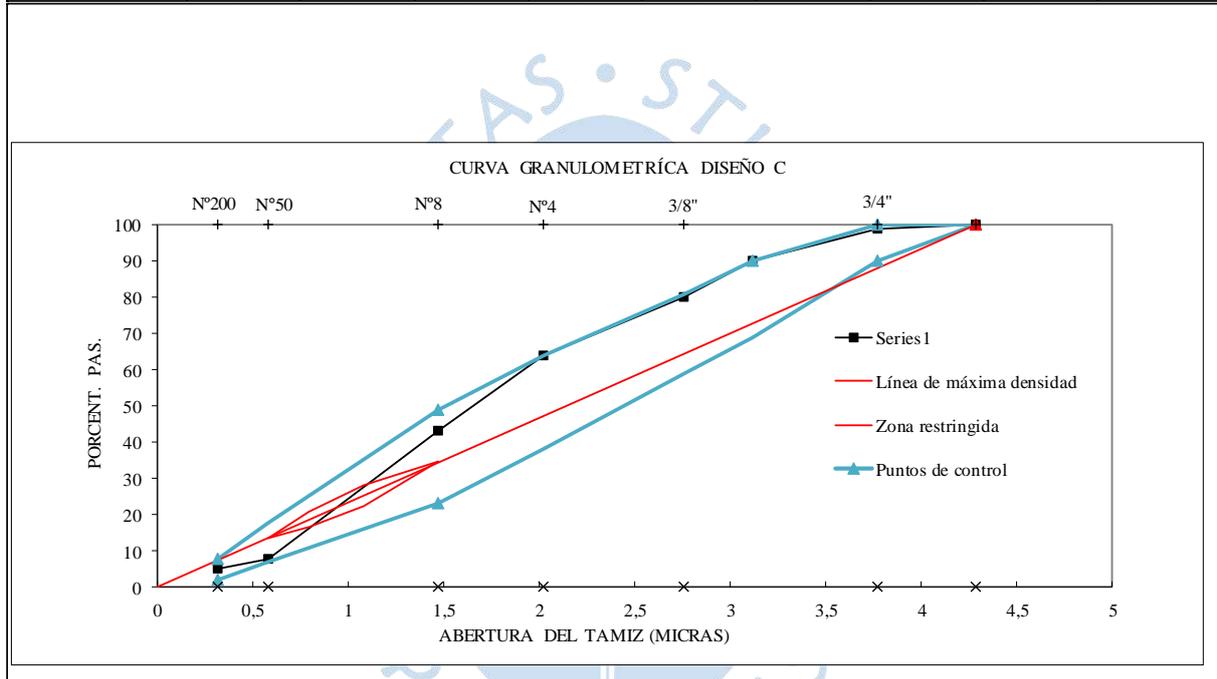
ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice CC. Modelo propuesto de granulometría y gráfica para el diseño C

SITIO:	AGREGADOS DE LA MINA RAMSÉS	MUEST. # 1:	3/4 plg
		MUEST. # 2:	1/2 plg
		MUEST. # 3:	3/8 plg
NORMA:	MEZC. FAJA 3/4" INSTITUTO DEL ASFALTO	MUEST. # 4:	ARENA
		MUEST. # 5:	FILLER

GRANULOMETRIA DISEÑO C

TAMIZ Nº	MUESTRAS % PASA					LÍMITES SUPERPAVE		MEZCLA	MEZCLA
	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4	Nº 5	MÍNIMO	MÁXIMO	% PASA	% R.A.
1"	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00
3/4"	98,68	100,00	100,00	100,00	100,00	90,00	100,00	99,00	1,00
1/2"	59,02	97,88	100,00	100,00	100,00	69,00	90,00	90,00	10,00
3/8"	18,73	64,36	98,89	97,48	100,00	59,00	81,00	80,00	20,00
Nº4	0,39	0,61	73,16	85,46	100,00	38,00	64,00	64,00	36,00
Nº8	0,18	0,06	47,47	66,61	100,00	23,00	49,00	43,00	57,00
Nº50	0,11	0,04	10,85	11,40	100,00	7,00	18,00	8,00	92,00
Nº200	0,09	0,02	1,52	1,96	46,72	2,00	8,00	5,00	95,00



ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice DD. Ensayo para determinar el porcentaje de disgregación de los agregados por efectos del sulfato de sodio

SOLUCIÓN:	SULFATOS
LOCALIZACIÓN:	ZAMORA CHINCHIPE

RESISTENCIA A LA DISGREGACIÓN

SERIE GRUESA

FRACCIÓN	TAMIZ		GRANULOMETRÍA	MAS. ANT. ENSAYO			MAS. DESPUES DE LA PRUEBA		PÉRD.	PÉRD. COMPEN.	ACCIÓN				
	Pasa	Retiene	PORCENTAJE	Parc.(g)	Total (g)	#	Tamiz	Pes. Reten. (g)	(%)	(%)	DESINTE-GRACIÓN	HUNDI-MIENTO	DESMENU-ZAMIENTO	AGRIETA-MIENTO	DESCA-MACIÓN
1	90 mm	63 mm													
2	63 mm	50 mm					31,5 mm								
	50 mm	37,5 mm													
3	37,5 mm	25 mm	6,7				16 mm	1,4	0,1						
	25 mm	19 mm													
4	19 mm	12,5 mm	40,1	672,1	1005,0		8 mm	986,71	1,8	0,7					
	12,5 mm	9,5 mm		332,9											
5	9,5mm	4,75 mm	53,2	301,2	301,2		4 mm	296,97	1,4	0,7					
TOTAL			100,0							1,6					

SERIE FINA

FRACCIÓN	TAMICES		GRNULOMETRÍA	MAS. ANTS. DE LA PRUEBA (g)	MAS. DESPUÉS DE LA PRUEBA (g)	PÉRDID. (%)	PÉRDID. COMPENSDA. (%)	DETALLES
	Pasa	Retiene	PORCENTAJE					
1	9,5mm	4,75mm						
2	4,75mm	2,36mm	48,9	100	98,9	1,1	0,5	
3	2,36mm	1,18mm	25,8	100,02	98,21	1,8	0,5	
4	1,18mm	0,600mm	15,6	100,02	97,13	2,9	0,5	
5	0,600mm	300mm	9,7	100,04	96,9	3,1	0,3	
TOTAL			100,0				1,8	

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice EE. Parámetros volumétricos de la mezcla elaborada en el Municipio de Loja (bacheo)

SITIO : **TOMA DE MUESTRA DE MEZCLA ASFALTICA EN LA PLANTA DE ASFALTO DEL MUNICIPIO DE LOJA CON AGREGADOS DE LA MINA DE ZAMORA**

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA PARA BACHEO ELABORADA EN EL MUNICIPIO DE LOJA

MUESTRAS	MEZCLA ASFÁLTICA							ESTABILIDAD								
	Peso en el Aire Sec. (gr)	Peso en el Aire S.S.S. (gr)	Peso en el agua (gr)	VOLUMEN (cm ³)	PES. ESPECÍFIC. BULK (gr/cm ³)	PES. ESPECÍFIC. MÁX. TEÓR. (gr/cm ³)	VACÍOS (%)	V.C.B.	V.A.M.	R.B.V.	VALORES DE CORRECC.	LECTUR. (kN)	LECTUR. (lbs)	CORREGID.	FLUJO 0.01"	
1	1048,14	1048,68	600,67	448,01	2,340	W. m.	1000,02	4,54	13,56	18,10	74,90	1,25	8,47	1899	2374	15,5
2	1020,75	1021,90	579,69	442,21	2,308	W. f+a	6880,00	5,82	13,38	19,20	69,69	1,32	7,65	1716	2265	17
3	973,85	977,24	544,97	432,27	2,253	W. f+a+m	7472,00	8,08	13,06	21,14	61,77	1,32	4,63	1038	1371	20
4																
PROMEDIO					2,300		2,451	5,18	13,47	18,65	72,29				2003	18

RESUMEN :

PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO	<u>2,451 gr/cm³</u>
CONTENIDO DE ASFALTO	<u>5,90 %</u>
ESTABILIDAD	<u>2,003 lb</u>
FLUJO	<u>18 1/100</u>
DENSIDAD	<u>2,300 gr/cm³</u>

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR:

Apéndice FF. Parámetros volumétricos de la mezcla elaborada en el Municipio de Loja (vía)

SITIO : **TOMA DE MUESTRA DE MEZCLA ASFALTICA EN LA PLANTA DE ASFALTO DEL MUNICIPIO DE LOJA CON AGREGADOS DE LA MINA DE ZAMORA**

PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS DE LA MEZCLA PARA VÍA ELABORADA EN EL MUNICIPIO DE LOJA

MUESTRAS	MEZCLA ASFÁLTICA										ESTABILIDAD					
	Peso en el Aire Sec. (gr)	Peso en el Aire S.S.S. (gr)	Peso en el agua (gr)	VOLUMEN (cm ³)	PES. ESPECÍFIC. BULK (gr/cm ³)	PES. ESPECÍFIC. MÁX. TEÓR. (gr/cm ³)	VACÍOS (%)	V.C.B.	V.A.M.	R.B.V.	VALORES DE CORRECC.	LECTUR. (kN)	LECTUR. (lbs)	CORREGID.	FLUJO 0.01"	
1	992,18	999,26	556,12	443,14	2,239	W. m.	1000,15	5,05	12,01	17,06	70,40	1,32	4,22	946	1249	14
2	1046,10	1050,33	590,34	459,99	2,274	W. f+a	6880,00	3,56	12,20	15,75	77,43	1,19	6,01	1348	1604	13
3	1001,37	1013,71	550,27	463,44	2,161	W. f+a+m	7456,00	8,37	11,59	19,96	58,07	1,19	6,07	1361	1620	15
PROMEDIO					2,225		2,358	4,30	12,10	16,40	73,92				1491	14

RESUMEN :

PESO ESPECÍFICO MÁXIMO TEÓRICO	2,358 gr/cm ³
CONTENIDO DE ASFALTO	5,46 %
ESTABILIDAD	1,491 lb
FLUJO	14 1/100
DENSIDAD	2,225 gr/cm ³

ING. JULIO NOVILLO JIMENEZ
ELABORADO POR: