

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA CIVIL**



***DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL***

UTILIZACIÓN DE VIDRIO PULVERIZADO Y MATERIAL PÉTREO  
DE LA CANTERA DE GUAYLLABAMBA EN EL MEJORAMIENTO  
DE MEZCLAS ASFÁLTICAS EN CALIENTE CON ASFALTO AC-20,  
MEDIANTE LA METODOLOGÍA SUPERPAVE.

***AUTOR:***

**TOAPANTA AYORA ALEJANDRO**

***DIRECTOR:***

**ING. GUSTAVO YÁNEZ**

**QUITO, 2019**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Fabián y Julia,

Quienes me apoyaron durante toda la carrera,

Ubicaron mi norte más de una vez y gracias a eso logré terminar mis estudios.

A mis hermanos, Lalo, Ani, Linda y Caro,

Que, con sus diferentes pensamientos y formas de ser,

Me ayudan a crecer y comprender mejor a las personas.

A mis sobrinos, Sebas, Mate, Erín, Julián y Sarita,

Para que sirva de guía y comprendan que el estudio

es la única forma de ser mejores, pero para poder servir mejor.

## AGRADECIMIENTOS

A la Pontificia Universidad Católica del Ecuador,

Por abrirme las puertas y permitirme encontrar un segundo hogar,

Al cual quiero y respetaré, siendo un buen profesional, con los valores aprendidos en ella.

A “Los muchachos” y al “Team Valle”,

Por haber sido excelentes compañeros de estudio, farras y calidad de personas,

Con los que espero contar por muchos años más, aunque los caminos nos aparten físicamente.

A mis ñaños, Nicolás, Alberto y Jean Carlos,

Por extenderme más que una amistad durante todos estos años y enseñarme

Que una vida con personas en quien confiar hace tus días mucho más alegres y tranquilos.

# TABLA DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	1
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	2
<b>TABLA DE CONTENIDOS</b> .....	3
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	6
<b>LISTA DE ILUSTRACIONES</b> .....	7
<b>LISTA DE ECUACIONES</b> .....	8
<b>1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b> .....	9
1.1. Resumen.....	9
1.2. Abstract .....	10
1.3. Introducción .....	11
1.4. Antecedentes .....	12
1.5. Justificación.....	13
1.6. Planteamiento del problema .....	14
1.7. Objetivo General .....	14
1.8. Objetivo específico.....	14
1.9. Alcance.....	15
<b>2. CAPÍTULO II: MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE</b> .....	16
2.1. Introducción al Superpave .....	16
2.2. Descripción general del método .....	17
2.2.1. Criterio para el agregado mineral .....	18
2.2.2. Criterio para el aglutinante asfáltico .....	21
2.2.3. Sistema de mezcla de diseño .....	23
2.3. Especificaciones de la metodología.....	24
2.3.1. Especificaciones para el agregado mineral .....	25
2.3.2. Especificaciones para el Aglutinante Asfáltico.....	29
2.3.3. Especificaciones para el diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA) .....	33
<b>3. CAPÍTULO III: AGREGADO MINERAL</b> .....	34
3.1. Propiedades de Origen.....	34
3.1.1. Ensayo para la determinación de la tenacidad de los agregados. ....	34
3.1.2. Ensayo para la determinación de la durabilidad de los agregados. ....	35
3.1.3. Ensayo para la determinación de los materiales deletéreos. ....	36
3.2. Propiedades de Consenso .....	37
3.2.1. Ensayo para la determinación de la angulosidad del agregado grueso. ....	37

3.2.2.	Ensayo para la determinación de la angulosidad del agregado fino. ....	38
3.2.3.	Ensayo para la determinación de partículas planas y alargadas. ....	39
3.2.4.	Ensayo para la determinación del contenido de Arena. ....	40
3.2.5.	Ensayo para la determinación de la gradación de los agregados. ....	41
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO IV: ASFALTO AC-20</b> .....	<b>43</b>
4.1.	Clasificación del Asfalto por Viscosidad.....	43
4.1.1.	Ensayo para la determinación de la viscosidad absoluta. ....	43
4.1.2.	Ensayo para la determinación de la viscosidad cinemática. ....	44
4.1.3.	Ensayo para la determinación del punto de chispa y llama. ....	45
4.1.4.	Ensayo para la determinación de la densidad de asfaltos semi sólidos. ....	46
4.1.5.	Ensayo para la determinación de penetración de materiales bituminosos. ....	47
4.1.6.	Ensayo para la determinación del punto de ablandamiento.....	48
4.1.7.	Ensayo para la determinación de la viscosidad con residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio (RTFO). ....	49
4.1.8.	Ensayo de película fina en horno rotatorio.....	49
4.1.9.	Ensayo para la determinación de la ductilidad de materiales bituminosos. ....	50
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO V: ASFALTO PG 64-22</b> .....	<b>52</b>
5.1.	Clasificación del asfalto por metodología Superpave .....	52
	<b>Ensayos con muestra tipo original:</b> .....	<b>52</b>
5.1.1.	Ensayo para la determinación del punto de chispa y llama. ....	52
5.1.2.	Ensayo para la determinación de la viscosidad a 135°C. ....	52
5.1.3.	Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.....	54
	<b>Ensayos con muestra tipo RTFO:</b> .....	<b>55</b>
5.1.4.	Ensayo de película fina en horno rotatorio.....	55
5.1.5.	Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.....	55
	<b>Ensayos con muestra tipo PAV:</b> .....	<b>55</b>
5.1.6.	Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.....	55
5.1.7.	Ensayo para la determinación de la rigidez de fluencia a flexión del asfalto. ....	55
<b>6.</b>	<b>CAPÍTULO VI: PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS</b> .....	<b>57</b>
6.1.	Contenido inicial de asfalto en la mezcla asfáltica .....	58
6.1.1.	Gravedad específica Bulk del agregado, Gsb.....	58
6.1.2.	Gravedad específica aparente del agregado, Gsa .....	58
6.1.3.	Gravedad específica efectiva del agregado, Gse .....	58
6.1.4.	Contenido de asfalto inicial, Pbi .....	59
6.2.	Vacíos de aire en la mezcla asfáltica, Va.....	61
6.2.1.	Gravedad específica máxima teórica, Gmm .....	62

6.2.2.	Gravedad específica Bulk, Gmb .....	63
6.3.	Vacíos en el agregado mineral, VMA.....	63
6.4.	Vacíos llenos de asfalto en la mezcla asfáltica, VFA.....	63
6.5.	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica, Pbe .....	64
6.6.	Proporciones de polvo, DP .....	64
6.7.	Módulo de rigidez .....	64
<b>7.</b>	<b>CAPÍTULO VII: CÁLCULOS Y RESULTADOS .....</b>	<b>68</b>
7.1.	Agregado mineral .....	68
7.1.1.	Dosificación de la mezcla de agregados pétreos .....	69
7.1.2.	Graduación .....	69
7.2.	Aglutinante asfáltico.....	70
7.2.1.	Asfalto clasificado por su viscosidad.....	71
7.2.2.	Asfalto clasificado por su grado de desempeño .....	71
7.3.	Temperatura de mezclado y compactación .....	72
	<b>Características de la mezcla asfáltica.....</b>	<b>72</b>
7.4.	Contenido inicial del aglutinante .....	73
7.5.	Contenido de aglutinante de diseño para la mezcla asfáltica .....	73
	<b>Representaciones gráficas de los valores obtenidos anteriormente .....</b>	<b>74</b>
7.6.	Mezcla asfáltica modificada con vidrio molido .....	77
	<b>Representaciones gráficas de los valores obtenidos anteriormente .....</b>	<b>78</b>
7.7.	Módulo de rigidez en la mezcla asfáltica modificada con vidrio molido .....	81
<b>8.</b>	<b>CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
	<b>Del Agregado mineral .....</b>	<b>83</b>
	<b>Del Aglutinante Asfáltico .....</b>	<b>84</b>
	<b>De los Parámetros Volumétricos .....</b>	<b>85</b>
	<b>Del Módulo de Rigidez .....</b>	<b>86</b>
	<b>Recomendaciones .....</b>	<b>88</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>90</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>94</b>
	<b>Del agregado mineral .....</b>	<b>95</b>
	<b>Del Aglutinante Asfáltico .....</b>	<b>100</b>
	<b>De los Parámetros Volumétricos .....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1</b> Requerimientos Superpave de propiedades de consenso del agregado .....	26
<b>Tabla 2.2</b> Puntos de control para la gradación del agregado .....	27
<b>Tabla 2.3</b> Límites máximos y mínimos del tamaño del tamiz dependiendo del tamaño máximo de agregado .....	28
<b>Tabla 2.4</b> Corrección para el aglutinante asfáltico en función de velocidad y nivel de tráfico ..	29
<b>Tabla 2.5</b> Especificación Grado de Desempeño del Aglutinante Asfáltico AASHTO M320-05 .....	31
<b>Tabla 2.6</b> Continuación Especificación para el Grado de Desempeño del Aglutinante Asfáltico AASHTO M320-05.....	32
<b>Tabla 2.7</b> Requerimientos de diseño Superpave HMA .....	33
<b>Tabla 3.1</b> Propiedades de origen y de Consenso .....	34
<b>Tabla 7.1</b> Resumen de resultados del Agregado Mineral.....	68
<b>Tabla 7.2</b> Dosificación de la Mezcla de Agregados.....	69
<b>Tabla 7.3</b> Resumen de resultados del Asfalto Clasificado por su Viscosidad .....	71
<b>Tabla 7.4</b> Resumen de resultados del Asfalto Clasificado por su Grado de Desempeño .....	71
<b>Tabla 7.5</b> Parámetros para Estimar el Contenido de Aglutinante de Diseño.....	73
<b>Tabla 7.6</b> Resumen de resultados del Contenido de Aglutinante de diseño .....	74
<b>Tabla 7.7</b> Resumen resultados Muestra Original con 7.3% Asfalto de Diseño .....	77
<b>Tabla 7.8</b> Resumen resultados Porcentaje de Vidrio Molido en Mezcla Asfáltica .....	78
<b>Tabla 7.9</b> Resumen resultados Mezcla Asfáltica con 30% de Vidrio Molido .....	81
<b>Tabla 7.10</b> Resumen de resultados del Módulo de Rigidez .....	81

## LISTA DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2.1</b> Partes para el Diseño Superpave .....	18
<b>Ilustración 2.2</b> Representación gráfica de puntos de control, zona de restricción y línea de densidad máxima.....	28
<b>Ilustración 6.1</b> Parámetros de Diseño Volumétrico.....	57
<b>Ilustración 6.2</b> Componente del Diagrama de Compactación de una HMA.....	61
<b>Ilustración 6.3</b> Ejemplo del Dispositivo de Ensayo para Módulo de Rigidez .....	67
<b>Ilustración 7.1</b> Granulometría por mallas del Agregado Mineral .....	70
<b>Ilustración 7.2</b> Temperatura de Mezclado y Compactación .....	72
<b>Ilustración 7.3</b> Gráfica % Va vs. % Asfalto .....	74
<b>Ilustración 7.4</b> Gráfica % VMA vs. % Asfalto .....	75
<b>Ilustración 7.5</b> Gráfica % VFA vs. % Asfalto .....	75
<b>Ilustración 7.6</b> Gráfica Densidad vs. % Asfalto .....	76
<b>Ilustración 7.7</b> Gráfica % Va vs. % Vidrio.....	78
<b>Ilustración 7.8</b> Gráfica % VMA vs. % Vidrio.....	79
<b>Ilustración 7.9</b> Gráfica % VFA vs. % Vidrio .....	79
<b>Ilustración 7.10</b> Gráfica Densidad vs. % Vidrio .....	80
<b>Ilustración 7.11</b> Gráfica Módulo de Rigidez vs. % Vidrio .....	82

## LISTA DE ECUACIONES

<b>Ecuación 6.1</b>	Gravedad específica Bulk del agregado.....	57
<b>Ecuación 6.2</b>	Gravedad específica aparente del agregado.....	57
<b>Ecuación 6.3</b>	Gravedad específica efectiva del agregado.....	58
<b>Ecuación 6.4</b>	Contenido de asfalto inicial.....	58
<b>Ecuación 6.5</b>	Cantidad de agregado en 1cm <sup>3</sup> .....	58
<b>Ecuación 6.6</b>	Volumen de asfalto absorbido.....	59
<b>Ecuación 6.7</b>	Volumen efectivo de asfalto.....	59
<b>Ecuación 6.8</b>	Vacíos de aire en la mezcla asfáltica.....	60
<b>Ecuación 6.9</b>	Vacíos en el agregado mineral.....	62
<b>Ecuación 6.10</b>	Vacíos llenos de asfalto en la mezcla asfáltica.....	62
<b>Ecuación 6.11</b>	Contenido de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica.....	63
<b>Ecuación 6.12</b>	Cantidad de asfalto estimado.....	63
<b>Ecuación 6.13</b>	Proporciones de polvo.....	63
<b>Ecuación 6.14</b>	Módulo de rigidez.....	65
<b>Ecuación 7.1</b>	Índice de Penetración.....	69
<b>Ecuación 7.2</b>	Variable dependiente para el índice de penetración.....	69

## CAPÍTULO I: GENERALIDADES

### 1.1. Resumen

En el presente trabajo de disertación se realizó el sistema de diseño Superpave completo, evaluando el agregado mineral por sus propiedades de consenso y de origen, el aglutinante asfáltico por su grado de desempeño y los parámetros volumétricos, cumpliendo con los requisitos de este sistema de diseño, para luego sustituir el agregado fino por vidrio molido, sin modificar la granulometría previamente obtenida, en porcentajes del 5%, 15%, 25%, 35% y 40% y así observar el comportamiento que tiene la mezcla y los parámetros de diseño en dos escenarios: el primero, una mezcla convencional, la cual se utiliza para la pavimentación de todas las vías a nivel nacional; y el segundo, un cambio en la homogeneidad en la estructura del agregado mineral fino.

Adicionalmente, cumpliendo con los requisitos del Ministerio de Transporte y Obras Públicas para vías de pavimento flexible se evaluó el asfalto por su grado de viscosidad.

Finalmente, para observar un comportamiento a largo plazo de la mezcla original y modificada, se realizó un ensayo de tensión indirecta, que mide el módulo de rigidez de una mezcla asfáltica caliente, permitiendo establecer, como su enunciado lo dice, una rigidez del pavimento diseñado.

## 1.2. Abstract

In the present dissertation work makes a full Superpave Mix Design, evaluating the mineral aggregate for its consensus and origin properties, the asphalt binder for its performance degree and the volumetric parameters, complying with the requirements of the mix design, after that, replace que fine aggregate by ground glass, without modifying the granulometry previously obtained, in percentages of 5%, 15%, 25%, 35% and 40% and thus observe the behavior of the mix and the design parameters in two different scenarios: the first one, a conventional mix, which is used for the paving all roads nationwide; and the second, a change in the homogeneity of the structure of the fine mineral aggregate.

Additionally, in accordance with the requirements of the Ministry of Transportation and Public Works for flexible pavement roads, the asphalt was evaluate for its viscosity grade.

Finally, to observe long-term behavior of the original mix and the modified, an indirect tension essay was performed, which measure the stiffness modulus of a hot asphalt mixture, allowing, as its statement says, the rigidity of the designed pavement.

### 1.3. Introducción

Los sistemas viales de nuestra civilización tienen sus orígenes antes de la invención de la rueda, la cual se supone fue alrededor del año 3500 A.C, siendo los desplazamientos de personas de un lugar a otro la base para la creación de caminos. Los primeros en utilizar vías para fines constructivos fueron los egipcios (tres mil años antes de Cristo), los cuales transportaban materiales de construcción desde las canteras hasta las pirámides, un ejemplo es la gran pirámide de Keops, el cual consta de una vía de 20m de ancho, 1 km de longitud y su punto más alto de 15 m.s.n.m. Después de ellos, fueron los romanos quienes revolucionaron los caminos contando un sistema vial con cerca de 85 mil millas de carreteras, que consta desde la ciudad de Roma hasta sus provincias conquistadas con la finalidad de mantener sus dominios. Se tienen registros de este tiempo el empleo de cal y pavimento de piedra de hasta 1.5m de espesor con 3 capas de piedras sucesivamente más finas, fijas en un mortero y una capa de bloque de piedra encajada. En los siglos XVI y XVIII la construcción de vías se potencializan en Francia, Inglaterra y Alemania, para ello se realizan estudios y se forman cuerpos de ingenieros, especialmente en Francia. A finales de este siglo, el francés Tresa Guest, propone el trato de la piedra para su colocación en capas, machacándola para utilizarla de base, cubriéndola con piedras más pequeñas; pero no fue mucho para que los ingleses Telford y Mac Adams complementen los estudios de Guest añadiendo polvo de piedra o arena. El sistema Telford “envolvía la excavación de una zanja y la instalación de cimientos de roca pesada elevada en el centro para producir una corona en la carretera una vez terminada, promoviendo así el drenaje” (Yáñez, 2016) , pero Mac Adams, sostenía que un suelo bien drenado era suficiente para soportar cualquier tipo de carga y colocaba la capa final de rocas trituradas directamente sobre el cimiento de tierra drenada. En 1890, se construye la

primera carretera con hormigón de concreto Portland, ya que aparecen los primeros automóviles a motor y ruedas de caucho. Con el advenimiento del transporte pesado durante la primera Guerra Mundial, la propuesta de Mac Adams quedó inservible y se optó por la utilización por el sistema Telford ya que proveía una mejor distribución de carga sobre la Subrasante.

Es a partir de la Segunda Guerra Mundial, que Estados Unidos se vio obligado a iniciar un proyecto que estudie el mejoramiento de las carreteras que brinde vías más rápidas, seguras y con mayor capacidad de carga para que no sufran fallas como hundimientos y roturas; este proyecto se denominó “Strategic Highway Research Program” y su mayor éxito fue el SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement).

#### 1.4. Antecedentes

El incremento en la presión de los neumáticos y las ruedas de los aviones en el pavimento producido por la continua movilización de tanques, camiones y aviones cargueros durante la Segunda Guerra Mundial, obligo a Estados Unidos a investigar una metodología que mejore las capacidades de resistencia del pavimento. El cuerpo de ingenieros empezó a analizar la metodología desarrollada por Bruce Marshall en 1939, quien era parte del departamento de carreteras de Mississippi (Mississippi Highway Department), para que en 1942 refinaran y adoptaran el procedimiento. (Lavin, 2003, pág. 142)

Con el pasar de los años el diseño de las mezclas asfálticas en caliente (HMA) adoptada para la metodología Marshall comenzó a exponer errores debido a factores que no se tomaron en cuenta en el desarrollo del procedimiento, dos de ellos que tienen mucha importancia son: la temperatura a la que va a estar expuesta (clima) y

la carga que va a soportar el pavimento. Observando estos elementos, en 1980, se desarrolló en Estados Unidos el Programa Estratégico de Investigación de Carreteras (Strategic Highway Research Program) con un presupuesto de 150 millones de dólares, enfocados en programas para mejorar el desempeño y duración de las carreteras; es aquí donde se desarrolla el sistema SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) en Octubre de 1987, por los investigadores a cargo de la Universidad de Texas en Austin, el cual mejora el rendimiento del pavimento analizando el aglutinante asfáltico, el agregado y la combinación de ellas (mezcla asfáltica). Sin embargo, no fue hasta 1991 que se adoptó el término SUPERPAVE para “significar la estructura integrada de especificaciones basadas en el rendimiento, métodos de prueba, equipos y protocolos, y un sistema de mezcla de diseño.” (Strategic Highway Research Program, 1994, pág. 4).

### 1.5. Justificación

En Ecuador el método utilizado para el diseño de la carpeta asfáltica es el método Marshall, el cual relaciona la experiencia en campo del diseñador con los parámetros obtenidos en laboratorio de los ensayos de las mezclas asfálticas, lo cual no asegura un buen grado de desempeño.

En la búsqueda de obtener un mejor desempeño del pavimento y una estandarización de los procesos, el SHRP entre el año 1987 y 1991, desarrolló un sistema llamado SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavement) el cual permite especificar el cemento asfáltico y el agregado mineral de manera individual, desarrollar diseños de mezclas asfálticas y analizar el desempeño del pavimento.

Con el presente trabajo de investigación se busca diseñar una mezcla de asfalto mediante la metodología SUPERPAVE, añadiendo vidrio molido como elemento

constitutivo de la mezcla, ayudando a que el vidrio (residuo de la construcción) sea aprovechado de mejor manera, garantizando el bienestar del medio ambiente y el buen vivir de los ciudadanos.

#### 1.6. Planteamiento del problema

A nivel nacional la falta de conciencia en los constructores y del gobierno central al no realizar reciclaje de algunos materiales de la construcción como el vidrio, y la falta de diseños adecuados de la carpeta asfáltica lo que conlleva a utilizar más materiales pétreos y bituminosos, produce un deterioro ambiental el cual tiene que ser controlado para asegurar un medio ambiente sano para las futuras generaciones. Frente a estos obstáculos, se ha planteado realizar un mejoramiento utilizando el vidrio de desecho de las construcciones y una metodología que optimiza los resultados del pavimento conocida como SUPERPAVE.

#### 1.7. Objetivo General

Diseñar una mezcla asfáltica en caliente adicionando vidrio pulverizado y material pétreo de la cantera de Guayllabamba con asfalto AC-20, mediante la metodología SUPERPAVE.

#### 1.8. Objetivo específico

- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos de la cantera de Guayllabamba.
  
- Evaluar las propiedades físicas y mecánicas del material ligante AC-20.

- Identificar la óptima relación volumétrica de asfalto y agregados utilizando el método SUPERPAVE.
- Determinar el porcentaje óptimo de vidrio molido como elemento constitutivo de la mezcla asfáltica en reemplazo de la arena.

### 1.9. Alcance

El presente trabajo de disertación busca diseñar una mezcla asfáltica agregando vidrio molido y material pétreo de la cantera de Guayllabamba utilizando el método SUPERPAVE que garantice mejores resultados y más exactos respecto al método Marshal.

Se pretende encontrar el porcentaje óptimo de vidrio en sustitución al contenido de arena que se va a tener en la mezcla asfáltica. En base a la tecnología Glassphalt, el contenido adecuado varía entre el 5% y el 40%, por lo tanto, se realizarán ensayos con el 5%, 15%, 25%, 35% y 40%. Este reemplazo de vidrio por arena permite dar un mejor uso a los residuos de vidrio producidos en la construcción.

## CAPÍTULO II: MÉTODO DE DISEÑO SUPERPAVE

### 2.1. Introducción al Superpave

La Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos, nombró a la Junta de Investigación de Transporte (*Transportation Research Board*) para estudiar el problema que tienen las carreteras, definir sus necesidades e implementar un nuevo programa estratégico de investigación vial. Este es el primero, de una serie de estudios, que nace con el nombre titulado *Strategic Transportation Research Study* (STRS). “Estos estudios evaluarán y recomendarán las prioridades de investigación para diversos modos de transporte según los beneficios esperados y las perspectivas de éxito” (Transportation Research Board, 1984, pág. v). Este estudio se dividió en dos partes, la primera: Visión General y Enfoque Fundamental del Estudio y la segunda: Áreas Potenciales de investigación.

Con un capital de \$150 millones dirigido al mejoramiento del rendimiento de las carreteras se creó el sub-plan *Strategic Highway Research Program* (SHRP), el cual destinó la tercera parte del capital para investigar la segunda parte del STRS con el objetivo de identificar y definir las propiedades de la carpeta de asfalto, el agregado y la mezcla en caliente del asfalto que influyan en el rendimiento, y el desarrollo de las especificaciones de los métodos de ensayo.

Uno de los subtemas tratados en la segunda parte del STRS es el asfalto, donde se tuvo como objetivo: “Mejorar el rendimiento del pavimento a través de un programa de investigación que proporcionará una mayor comprensión de las propiedades químicas y físicas de los cementos asfálticos.” (Transportation Research Board, 1984, pág. 63), es por esto que nace el *SHRP Asphalt Research Program*, en el año 1980, aumentando una directriz específica para el programa: “el producto final se basará en

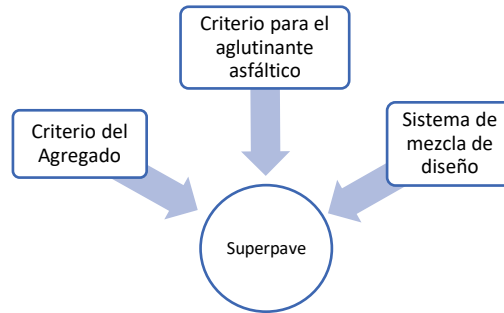
las especificaciones de desempeño del asfalto, con o sin modificación y el desarrollo de un sistema de análisis de mezcla de asfaltos y agregados (AAMAS).” (Strategic Highway Research Program, 1994, pág. 3)

Finalmente, en 1987, el comité ejecutivo que se encontraba a cargo del SHRP, aprobó la contratación del plan para desarrollar el *SHRP Asphalt Research Program*. Delegando la responsabilidad del desarrollo de la especificación de la carpeta de asfalto basada en su rendimiento, la especificación de la mezcla de asfalto y agregado, el diseño de la mezcla y de la dirección técnica y coordinación de todo el programa a los colaboradores de la Universidad de Texas en Austin, en octubre del mismo año.

Después de 5 años de investigación se obtuvo como resultado un sistema para el diseño de mezclas de asfaltos en caliente y ensayos de su rendimiento, que involucra la interacción del asfalto, el agregado mineral y la mezcla de ambos, nombrado *Superior Performing Asphalt Pavement*, conocido por sus siglas como SUPERPAVE.

## 2.2. Descripción general del método

Superpave es un sistema de diseño de mezcla que contempla temperaturas extremas y cargas pesadas. Este relaciona la selección de agregados, la selección del aglomerante asfáltico basado en el clima, la compactación basada en el tráfico de diseño, la selección de la granulometría del material pétreo y la cantidad de aglutinante asfáltico basado en sus propiedades volumétricas. El método de diseño Superpave se divide en tres áreas interrelacionadas:



*Ilustración 2.1 Partes para el Diseño Superpave*

### 2.2.1. Criterio para el agregado mineral

Las propiedades del agregado mineral son importantes para el rendimiento de la mezcla de asfalto, las cuales no han sido incluidas en los métodos existentes como el método Marshall. El sistema Superpave ha especificado el uso de ciertas propiedades divididas en dos grupos, propiedades de origen y propiedades de consenso.

#### *2.2.1.1. Propiedades de origen*

Las propiedades de origen son utilizadas por la mayor parte de las agencias viales para calificar localmente las propiedades del agregado. Si bien estas propiedades son importantes, los valores críticos no están descritos en las especificaciones Superpave ya que son parámetros de aceptación de la fuente de origen.

- **Durabilidad del agregado**, definido como el porcentaje de degradación del ensayo a la acción del sulfato de sodio o magnesio.
- **Dureza del agregado**, definido como un porcentaje de desgaste del ensayo de abrasión de la máquina de Los Ángeles.
- **Materiales nocivos del agregado**, definido como el porcentaje por peso de contaminantes indeseables.

### *2.2.1.2. Propiedades de consenso*

Las propiedades de consenso son aquellas que los investigadores del SHRP consideraron críticas para lograr un alto rendimiento de las mezclas asfálticas en caliente (HMA), estas propiedades fueron evaluadas a varios niveles dependiendo del volumen de tráfico y la posición del pavimento. Altos niveles de tráfico y la posición de la mezcla en la superficie (como posición poco profunda del pavimento) requieren valores más estrictos de las propiedades de consenso. (Asphalt Institute, 2001)

- **Angulosidad del agregado grueso**, definido como el porcentaje por peso de partículas de agregado mayores que 4.75mm (tamiz No. 4) con una o más caras fracturadas.
- **Angulosidad del agregado fino**, definido por el porcentaje de vacíos de aire de agregados compactados de manera holgada.
- **Partículas planas y alargadas**, definidas como el porcentaje por peso de agregado grueso que tienen una relación de dimensiones máximas a mínimas superiores a 5.
- **Contenido de arcilla**, definido por el uso del ensayo de equivalente de arena en la parte de mezcla de agregados que pasan el tamiz No. 8 (2.36 mm).
- **Control de gradación**, definidos por los puntos de control y la zona de restricción para la gradación. (Cominsky, Leahy, & Harrigan, 1994)

Al especificar la angulosidad de los agregados gruesos y finos, Superpave busca lograr una mezcla asfáltica caliente con un alto grado de fricción interna y, por lo tanto, una alta resistencia a la cizalladura para la resistencia a la rodadura.

Limitando la cantidad del contenido de arcilla se mejora la adhesión del aglutinante asfáltico y el agregado.

La recomendación más importante en los agregados en el sistema Superpave es la gradación de los agregados. La metodología recomienda ciertos puntos de control y una zona de restricción graficada en un cuadro de potencia 0.45 que se usa para trazar la gradación. Los puntos de control y la zona restringida están propuestas para evitar el uso de gradaciones indeseables, que resulten mezclas pobres.

La zona de restricción tiene dos propósitos:

- Limitar la inclusión de grandes cantidades de arena natural que cause ondas o “jorobas” en la curva de gradación.
- Rechazar las gradaciones que caen en la línea de densidad máxima, teniendo vacíos inadecuados en el agregado mineral (VMA).

Para esta propiedad, el rango de gradación no se ve afectada por la carga de tráfico, al igual que los puntos de control y la zona de restricción, pero sí, por el tamaño del agregado de la mezcla; es por eso que para esta propiedad incluye dos términos en los límites gradación: tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

Finalmente, el diseñador de la mezcla se ve obligado a desarrollar gradaciones que pasen bajo, en lugar de arriba, de la zona de restricción; esto producirá una gradación más gruesa y potencializará el desarrollo de una estructura robusta del agregado.

### 2.2.2. Criterio para el aglutinante asfáltico

Las especificaciones Superpave difieren de otras especificaciones en los ensayos utilizados para medir las propiedades físicas del aglutinante asfáltico que pueden relacionarse con mecanismos de falla. Una característica única de la especificación del aglutinante para Superpave es que, en lugar de realizar un ensayo a temperatura constante y variar el valor especificado, el valor especificado se mantiene constante y la temperatura de ensayo a la que se alcanza este valor varía, conocido como grado de desempeño del asfalto (grado PG). Es considerada una mejora sobre los sistemas de penetración y viscosidad ya que los ensayos son conducidos hacia ambientes que simulan las condiciones que se somete el pavimento e incorpora conceptos de confiabilidad. (Roberts, Mohammad, & Wang, 2002).

El clima, tráfico y envejecimiento son los factores críticos que más afectan al desempeño del asfalto en los pavimentos. Para alcanzar el grado de desempeño ideal, estos factores son simulados en la metodología de ensayos Superpave mediante:

- **Clima:** para simular las condiciones climáticas a las que el asfalto va a estar sometido, se realizan ensayos a diferentes temperaturas, definiendo sus límites máximos y mínimos de temperatura.
- **Tráfico:** la carga y velocidad de diseño son seleccionados para representar la velocidad de tráfico (cantidad) simulando las condiciones de tráfico.
- **Envejecimiento del asfalto:** esta propiedad se simula sometiendo al aglutinante asfáltico a pruebas de envejecimiento en dos condiciones diferentes, la primera, que representa el estado inmediatamente después de la construcción, se realiza mediante el ensayo de horno rotatorio de película

delgada (RTFO) y las condiciones de servicio a largo plazo, en el ensayo de vasija de envejecimiento a presión (PAV).

Los parámetros considerados en el grado de desempeño del aglutinante están relacionados a los siguientes mecanismos de falla: deformación permanente o surco en el pavimento, agrietamiento por fatiga y el agrietamiento térmico.

Típicamente, la producción de mezclas asfálticas se realiza a altas temperaturas, donde el aglutinante se encuentra en estado líquido, y, por lo tanto, el grado PG incluye un límite máximo de viscosidad para asegurar la adecuada manipulación durante el bombeo y la mezcla. Esta manejabilidad del asfalto es determinada con el ensayo de viscosidad a altas temperaturas (135°C) usando un viscosímetro rotacional (RV) para asegurar la suficiente fluidez durante el bombeo y mezclado.

El reómetro dinámico de corte (DSR) es usado para caracterizar el comportamiento visco elástico y evaluar la deformación potencial permanente y el agrietamiento por fatiga. El principio de este ensayo es que el asfalto se comporte de manera sólido-elástica a bajas temperaturas y como un fluido viscoso a altas temperaturas. Estos comportamientos pueden ser definidos al medir el módulo complejo de corte ( $G$ ) y el ángulo de desfase ( $\delta$ ) bajo condiciones específicas de temperatura y frecuencia de carga.

El reómetro de viga a flexión (BBR) es utilizado para evaluar el agrietamiento potencial térmico a bajas temperaturas, donde las propiedades del asfalto se controlan para minimizar la acumulación de estrés térmico y evitar el uso de asfaltos demasiado frágiles, determinando su rigidez de fluencia ( $S$ ) y el rango de fluencia logarítmica ( $m$ ).

### 2.2.3. Sistema de mezcla de diseño

Durante las investigaciones del SHRP también se reconoció la necesidad de un equipo de compactación para laboratorio que sea relativamente simple, económico, y se pueda representar in-situ de la construcción. El equipo también debía proporcionar el potencial para propósitos de control en campo, y es por esto, que el sistema completo de diseño de mezcla, incluyendo el control en campo, se basa en el uso del SGC, por sus siglas en inglés Superpave Gyrotory Compactor. El proceso de compactación mediante este equipo se diseñó para que "... compactara de forma realista las muestras de prueba a las densidades logradas en condiciones reales de clima y carga del pavimento y también para que pueda identificarse el comportamiento potencial de la mezcla sensible y problemas de compactación similares" (Coree & VanDerHorst, 1998).

Dos principales características fueron los puntos decisivos para la utilización del equipo dentro del sistema de diseño de mezclas Superpave:

- 1) La importancia de las muestras compactadas, que simulan el rendimiento de los núcleos de pavimento realizados con la combinación de agregado y asfalto.
- 2) La capacidad del equipo al proveer información de la compactibilidad de una mezcla en especial mediante la entrega de datos durante la compactación, y que las mezclas ensayadas no exhiben un comportamiento de mezcla blanda y no se densifiquen a peligrosas reducciones de contenidos de vacíos de aire bajo condiciones de tráfico.

El compactador giratorio utilizado en Superpave tiene las siguientes características:

- Ángulo de giro de  $1.25 \pm 0.02^\circ$ ,
- Velocidad de giro de 30 giros por minuto,
- Presión vertical durante los giros de 600kPa, y
- La capacidad de moldear especímenes cilíndricos de 150mm (6 in) de diámetro y altura.

El sistema de mezclas de diseño también incluye procedimientos para evaluar los efectos ante el envejecimiento y sensibilidad a la humedad.

El principal control del envejecimiento en el sistema de diseño de mezclas Superpave es a través de la combinación del ensayo de horno de película delgada y el ensayo de tubo de envase a presión que miden el envejecimiento a largo plazo del asfalto.

Para las condiciones tempranas de envejecimiento o envejecimiento a corto plazo, se coloca la muestra (inmediatamente después de ser mezclada) a una profundidad uniforme durante cuatro horas a una temperatura de  $135^\circ\text{C}$ , luego se la lleva a la temperatura de compactación adecuada para esa muestra y se la compacta. Este proceso simula el envejecimiento que tiene el asfalto durante la mezcla y el proceso de construcción del pavimento.

### 2.3. Especificaciones de la metodología

Dentro de la metodología Superpave existe un estricto criterio de aceptación para los materiales que se van a utilizar en el diseño de mezcla, permitiendo obtener mejores resultados en la optimización de materiales, controles de duración y calidad, y evaluación del pavimento bajo condiciones de temperatura que se presentan a lo largo de su vida útil.

A continuación, se presenta los estándares que deben cumplir los materiales para poder utilizar la metodología Superpave.

### 2.3.1. Especificaciones para el agregado mineral

La Asociación Americana de Carreteras Estatales y de Transporte (AASHTO) establece los requerimientos para las propiedades de consenso, el tamaño máximo de agregado y los puntos de control en la designación M 323-07: Especificación estándar para el diseño de mezcla volumétrica Superpave.

#### *2.3.1.1. De las Propiedades de Consenso*

Es importante especificar la carga de equivalente de un solo eje (ESALs) para proyectos con un periodo de 20 años de diseño, ya que es el parámetro inicial para todos los requerimientos Superpave.

Las propiedades de consenso se basan en los resultados propuestos por las siguientes normas:

- ASTM D 5821: Caras fracturadas en el agregado grueso.
- ASTM C 1252: Vacíos en el agregado fino.
- ASTM D 2419: Equivalente de arena.
- ASTM D 4791: Partículas planas y alargadas.

La siguiente tabla muestra los requisitos que debe cumplir estas propiedades:

Requerimientos Superpave de propiedades de consenso del agregado						
ESALs Diseño (millón)	% Caras Fracturadas del Ag. Grueso		% Contenido de Vacíos del Ag. Fino		Equivalente de arena	Partículas planas y alargadas
	Profundidad superficie		Profundidad superficie			
	<= 100mm	> 100mm	<= 100mm	> 100mm	% mínimo	% máximo
< 0.3	55/--	--/--	-	-	40	-
0.3 a < 3	75/--	50/--	40	40	40	10
3 a < 10	85/80	60/--	45	40	45	10
10 a < 30	95/90	80/75	45	40	45	10
> 30	100/100	100/100	45	45	50	10

Tabla 2.1 Requerimientos Superpave de propiedades de consenso del agregado

\*85/80 indica que el 85 por ciento del agregado grueso tiene una cara fracturada y el 80 por ciento tiene dos o más caras fracturadas. (American Association of State Highway and Transportations Officials, págs. M 323-7)

### 2.3.1.2. De la Combinación del Agregado

La combinación del agregado debe tener un tamaño máximo nominal de 4.75mm a 19mm para superficies de rodadura y no mayores a 37.5mm para sub-bases, en mezclas asfálticas en caliente.

### 2.3.1.3. De la Gradación del Agregado

Superpave utiliza un gráfico de gradación de 0.45 de potencia para definir gradaciones permisibles. Esta gráfica muestra la distribución de tamaño de partícula acumulada de una mezcla de agregados. Las ordenadas (eje vertical) de la gráfica se asigna al porcentaje que pasa, mientras que las abscisas (eje horizontal) presenta una escala aritmética de tamaños de tamices en milímetros, elevado a la 0.45 potencia. Una característica importante que tiene esta gráfica es la gradación de densidad máxima la cual se grafica como una línea recta desde el tamaño de agregado máximo hasta el origen.

- Tamaño máximo nominal: un tamaño de tamiz más grande que el primero en retener más del 10 por ciento.

- Tamaño máximo: un tamaño de tamiz más grande que el tamaño máximo nominal

### 2.3.1.3.1. Puntos de Control

Los puntos de control funcionan como rangos por los cuales la gradación debe pasar estos puntos de control dependen del tamaño máximo nominal del agregado como se muestra en la tabla a continuación. Para establecer los puntos de control y la gradación adecuada de la combinación del agregado, Superpave establece los siguientes ensayos:

- ASTM C 117: Material fino que pasa el tamiz No. 200.
- ASTM C 136: Análisis granulométrico del agregado fino y grueso.

Puntos de control para la gradación del agregado												
Tamaño Tamiz (mm)	Tamaño máximo nominal del agregado - Puntos de control (porcentaje que pasa)											
	37.5		25		19		12.5		9.5		4.75	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
50.00	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37.50	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-	-	-
25.00	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-	-	-
19.00	-	-	-	90	90	100	100	-	-	-	-	-
12.20	-	-	-	-	-	90	90	100	100	-	100	-
9.50	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100	95	100
4.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	90	100
2.36	15	41	19	45	23	49	28	58	32	67	-	-
1.18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	60
0.075	0	6	1	7	2	8	2	10	2	10	6	12

Tabla 2.2 Puntos de control para la gradación del agregado (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

### 2.3.1.3.2. Zona de Restricción

La zona de restricción se encuentra sobre la línea de densidad máxima entre los tamaños intermedios 4.75mm (o 2.36mm) y 0.3mm, que corresponden a los

tamaños de tamices N°4 al N°50; formando una banda restrictiva, la cual se recomienda generalmente no pase la gradación del agregado. Esta previene que las combinaciones de agregado sigan la línea de densidad máxima, ya que las que lo hacen tienen una inadecuada cantidad de vacíos en el agregado (VMA) que no permite suficiente asfalto para una mayor durabilidad.

La siguiente tabla indica los valores máximos y mínimos para la zona de restricción de la combinación del agregado:

Límites máximos y mínimos del tamaño del tamiz para el Tamaño máximo nominal de agregado - (% que pasa)											
En la zona de restricción		37.5 mm		25.0 mm		19.0 mm		12.5 mm		9.5 mm	
Tamiz	Tam. (mm)	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
4	4.75	34.7	34.7	39.5	39.5	-	-	-	-	-	-
8	2.36	23.3	27.3	26.8	30.8	34.6	34.6	39.1	39.1	47.2	47.2
16	1.18	15.5	21.5	18.1	24.1	22.3	28.3	25.6	31.6	31.6	37.6
30	0.60	11.7	15.7	13.6	17.6	16.7	20.7	19.1	23.1	23.5	27.5
50	0.30	10.0	10.0	11.4	11.4	13.7	13.7	15.5	15.5	18.7	18.7

Tabla 2.3 Límites máximos y mínimos del tamaño del tamiz dependiendo del tamaño máximo de agregado (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

A continuación, se presenta un ejemplo gráfico de los puntos mencionados anteriormente: gradación de 0.45 de potencia, línea de densidad máxima, puntos de control y zona de restricción.

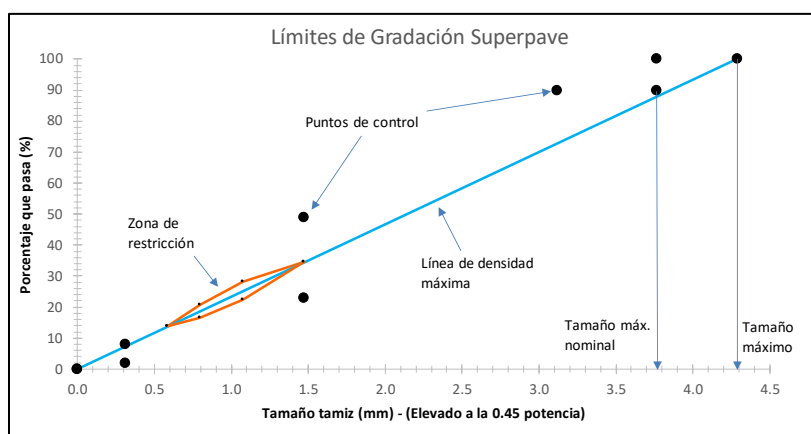


Ilustración 2.2 Representación gráfica de puntos de control, zona de restricción y línea de densidad máxima

### 2.3.2. Especificaciones para el Aglutinante Asfáltico

El aglutinante asfáltico deberá ser calificado por su grado de desempeño (PG), propuestos por la AASHTO M 320, las cuales consideran apropiadamente el clima y la carga de tráfico para el lugar del proyecto a realizar o como lo especificado por los documentos del contrato y su respectivo ajuste dependiendo la carga equivalente de diseño (ESALs) y la tasa de carga de tráfico.

#### 2.3.2.1. Del Ajuste del Grado de Temperatura

En orden de prevenir la fatiga por agrietamiento, la deformación permanente o la rotura los cuales son influenciados por la estructura del pavimento, el tráfico y las propiedades de los agregados a condiciones climáticas extremas como altas o bajas temperaturas no registradas en una zona los requerimientos Superpave han propuesto la modificación en la elección del grado PG del aglutinante asfáltico para su uso en HMA. Esta modificación incluye el aumento de grado equivalente que depende de la carga y velocidad de tráfico de diseño.

La siguiente tabla indica el ajuste de la temperatura del aglutinante asfáltico:

Selección del aglutinante asfáltico en función de la velocidad y el nivel de tráfico			
ESALs de diseño (millón)	Ajuste al grado de alta temperatura del aglutinante <sup>a</sup>		
	Tasa de carga de tráfico		
	Permanente <sup>b</sup>	Baja <sup>c</sup>	Estándar <sup>d</sup>
< 0.3	-	-	-
0.3 a < 3	2	1	-
3 a < 10	2	1	-
10 a < 30	2	1	-
> 30	2	1	1

Tabla 2.4 Corrección para el aglutinante asfáltico en función de la velocidad y nivel de tráfico (American Association of State Highway and Transportations Officials, 2008)

- a.** Ajustar el grado de alta temperatura por el número de grados equivalentes indicados, considerando que un grado es equivalente a 6°C. No ajustar el grado de temperatura baja.
- b.** Carga permanente: velocidad promedio es menor a 20 Km/h.
- c.** Carga baja: velocidad promedio se encuentra entre 20 km/h y 70 km/h.
- d.** Carga Estándar: velocidad de tráfico es mayor a 70 km/h.

### *2.3.2.2. Del Grado PG*

La designación AASHTO M320-05 cubre los requerimientos para un cierto grado de desempeño del aglutinante asfáltico. Esta normativa permite determinar la mínima y máxima temperatura a la cual dicho asfalto tiene propiedades físicas adecuadas, que dependen de la localización del proyecto. El grado PG viene dado por la expresión XX-YY dónde:

- XX, es el grado de temperatura más alta,
- -YY, es el grado de temperatura más baja.

La siguiente tabla presenta las especificaciones para el grado PG XX-YY del asfalto:

Especificación para el Grado de Desempeño del aglutinante asfáltico																					
Grado de desempeño	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 de diseño máxima del pavimento, °C.	<46			<52						<58					<64						
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C.	>-34	>-40	>-46	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-46	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40
<b>Aglutinante Original</b>																					
Punto de chispa, Temp. Mín., °C.	230																				
Viscosidad, máx. 3 Pa.s, Temp. ensayo °C.	135																				
Corte dinámico, G*/senδ mín. 1.00 kPa Temp. ensayo °C.	46			52						58					64						
<b>Residuo del Horno Laminado de Película Delgada (RTFO)</b>																					
Cambio de masa, máximo %.	1.00																				
Corte dinámico, G*/senδ mín. 2.20 kPa Temp. ensayo °C.	46			52						58					64						
<b>Residuo de Botella de Envejecimiento a Presión (PAV)</b>																					
Temperatura de envejecimiento PAV, °C	90			90						100					100						
Corte dinámico, G*/senδ máx. 5000 kPa Temp. ensayo °C.	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16
Fluencia Creep, S máx. 300 Mpa, Valor m mín. 0.300, temperatura ensayo °C.	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30
Tensión directa, Tensión de falla mín. 1.0% Temp ensayo °C.	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30

Tabla 2.5 Especificación para el Grado de Desempeño del Aglutinante Asfáltico AASHTO M320-05

Continuación - Especificación para el Grado de Desempeño del aglutinante asfáltico																
Grado de desempeño	PG 70						PG 76					PG 82				
	10	16	22	28	34	40	10	16	22	28	34	10	16	22	28	34
Temperatura de diseño máxima del pavimento, °C.	<70						<76					<82				
Temperatura de diseño mínima del pavimento, °C.	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-40	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34	>-10	>-16	>-22	>-28	>-34
<b>Aglutinante Original</b>																
Punto de chispa, Temp mín., °C.	230															
Viscosidad, máx. 3 Pa.s, Temp ensayo °C.	135															
Corte dinámico, G*/senδ mín. 1.00 kPa Temp ensayo °C.	70						76					82				
<b>Residuo del Horno Laminado de Película Delgada (RTFO)</b>																
Cambio de masa, máximo %.	1.00															
Corte dinámico, G*/senδ mín. 2.20 kPa Temp ensayo °C.	70						76					82				
<b>Residuo de Botella de Envejecimiento a Presión (PAV)</b>																
Temperatura de envejecimiento PAV, °C	100 (110)						100 (110)					100 (110)				
Corte dinámico, G*/senδ máx. 5000 kPa Temp ensayo °C.	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28
Fluencia Creep, S máx. 300 Mpa, Valor m mín. 0.300, temperatura ensayo °C.	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24
Tensión directa, Tensión de falla mín. 1.0%, Temp ensayo °C.	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24

Tabla 2.6 Continuación Especificación para el Grado de Desempeño del Aglutinante Asfáltico AASHTO M320-05

### 2.3.3. Especificaciones para el diseño de mezclas asfálticas en caliente (HMA)

Los especímenes ensayados mediante el compactador giratorio, deben cumplir con los criterios de densidad relativa, vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA) y proporciones de polvo (DP) en la carpeta presentados a en la siguiente tabla:

Requerimientos de diseño Superpave HMA											
ESALs de diseño (millón)	% Gravedad específica máxima teórica			Porcentaje mínimo de vacíos en agregado mineral (VMA)						Rango de % VFA	Rango de % DP
				Tamaño de agregado máximo nominal (mm)							
	N inicial	N diseño	N final	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm		
< 0.3	≤ 91.5	96.0	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	70-80	0.6-1.2
0.3 a < 3	≤ 90.5	96.0	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-78	0.6-1.2
3 a < 10	≤ 89.0	96.0	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75	0.6-1.2
10 a < 30	≤ 89.0	96.0	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75	0.6-1.2
> 30	≤ 89.0	96.0	≤ 98	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	65-75	0.6-1.2

Tabla 2.7 Requerimientos de diseño Superpave HMA (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008)

## CAPÍTULO III: AGREGADO MINERAL

En este capítulo se desarrolla los ensayos propuestos por la metodología Superpave mencionados en el Capítulo II aplicados en la cantera de Guayllabamba, que tiene por objetivo el presente trabajo de disertación.

Como se ha mencionado ya con anterioridad, las propiedades de los agregados considerados en el sistema de mezcla de diseño Superpave se dividen en dos: propiedades de origen y consenso.

<i>Propiedades de Origen</i>	<i>Propiedades de Consenso</i>
Tenacidad	Angulosidad del Agregado Grueso
Durabilidad	Angulosidad del Agregado Fino
Materiales Deletéreos	Contenido de Arena
	Partículas Planas y Alargadas
	Gradación

Tabla 3.1 Propiedades de origen y de Consenso

### 3.1. Propiedades de Origen

#### 3.1.1. Ensayo para la determinación de la tenacidad de los agregados.

##### 3.1.1.1. Normativa

ASTM C131 – AASHTO T 96 – INEN 860/861

##### 3.1.1.2. Definición

La tenacidad se define como el porcentaje de masa que pierde el agregado al finalizar la prueba de abrasión de Los Ángeles.

##### 3.1.1.3. Significado y uso

Determinar la resistencia al aplastamiento y al desgaste abrasivo del agregado para soportar el manejo durante el almacenamiento, transporte, mezcla y compactación

mediante un porcentaje de aceptabilidad, el cual es asignado y aprobado dependiendo de su localidad.

#### *3.1.1.4. Metodología*

El ensayo requiere que el agregado sea colocado dentro de un tambor giratorio de acero con un número específico de esferas de acero, las cuales dependen del tamaño máximo y la gradación natural del agregado; a medida que el tambor gira con un específico número de revoluciones, típicamente 500, el agregado es sometido a la abrasión y al aplastamiento. Al terminar el proceso, el material es removido del tambor y se pasa a través de un tamiz No. 12 (1.7mm), siendo la degradación como el porcentaje de pérdida. (ASTM C131, 2014)

### 3.1.2. Ensayo para la determinación de la durabilidad de los agregados.

#### *3.1.2.1. Normativa*

ASTM C 88 – AASHTO T 104 – INEN 863

#### *3.1.2.2. Definición*

La durabilidad de los agregados se define como la degradación o desintegración por saturación en soluciones de sulfato de sodio o magnesio.

#### *3.1.2.3. Significado y uso*

Determinar la resistencia de los agregados debido al deterioro climático producidos por ciclos de humectación y secado o congelamiento y descongelamiento. El ensayo de sulfatos simula los efectos de expansión de agua en los poros del agregado durante el cambio de estos ciclos.

#### *3.1.2.4. Metodología*

El ensayo está orientado para la determinación de la resistencia en agregado grueso y fino, cuyos pesos se definen dependiendo del tamaño del tamiz. Las muestras de agregados son saturadas con soluciones de sulfato de sodio o de magnesio, colocados en un horno de secado a temperatura constante y secado de masa constante, lo cual hace que el sulfato se cristalice en los poros del agregado. El reintroducir la muestra en la solución, los cristales de sulfato se expanden cuando son rehidratados. (ASTM C88, 2013)

#### 3.1.3. Ensayo para la determinación de los materiales deletéreos.

##### *3.1.3.1. Normativa*

ASTM C 142 – AASHTO T 112 – INEN 698

##### *3.1.3.2. Definición*

Los materiales deletéreos se definen como el porcentaje por peso de contaminantes indeseables.

##### *3.1.3.3. Significado y uso*

Prevenir problemas estéticos del pavimento los cuales son indeseables y pueden albergar pequeñas cantidades de agua. Los materiales deletéreos que se pueden encontrar típicamente son arcillas, carbón, esquistos, maderas (virutas), mica, entre otros materiales suaves.

##### *3.1.3.4. Metodología*

Este ensayo cubre la determinación aproximada de terrones de arcilla y partículas disgregables en los agregados pétreos. Las muestras de agregados gruesos y finos se

determinan dependiendo del tamaño del tamiz al que se retienen. Se sumerge el material en agua destilada durante un periodo de  $24h \pm 4h$ . Con el pulgar y el dedo índice se las aprieta y enrolla intentando romper en pequeños tamaños. Separar todas las partículas que no fueron quebradas y secarlas a temperatura constante de  $110 \pm ^\circ C$  y determinar el porcentaje de masa de contaminantes (ASTM C142, 2010).

## 3.2. Propiedades de Consenso

### 3.2.1. Ensayo para la determinación de la angulosidad del agregado grueso.

#### *3.2.1.1. Normativa*

ASTM D 5821 – AASHTO TP61-02

#### *3.2.1.2. Definición*

Las caras fracturadas del agregado se definen como un área fragmentada con bordes afilados cuya área es al menos igual al 25% de la mayor proyección de la partícula. El método cumple para tamaño de agregados mayores que el tamiz No. 4 (4.75-mm).

#### *3.2.1.3. Significado y uso*

Determinar el número de caras fracturadas para asegurar una adecuada estructura del agregado que resista esfuerzos de corte que causa hundimientos en el pavimento. El requerimiento de caras trituradas/fracturadas dependen del volumen de tráfico y en la capa del pavimento. Altos volúmenes de tráfico y capas superiores del pavimento demandan más caras fracturadas.

#### *3.2.1.4. Metodología*

Lavar las muestras de agregado, designadas de acuerdo al tamaño del tamiz, y secarlas a temperatura constante. Esparcir las muestras secas en una superficie suficientemente

amplia que permita la inspección cuidadosa de cada partícula; para que se pueda verificar que la muestra cumpla con el criterio, se la debe sostener de tal manera que la cara pueda ser observada directamente. Con una espátula separar el agregado en dos categorías: 1) partículas con caras fracturadas que cumplan los criterios y 2) partículas que no cumplan el criterio. Determinar las masas de cada una y reportar el porcentaje de masa que representan las caras fracturadas. (ASTM D5821, 2017)

La norma ASTM D-5821 indica ejemplos gráficos en los cuales se puede basar para la determinación del criterio de caras fracturadas del agregado grueso.

### 3.2.2. Ensayo para la determinación de la angulosidad del agregado fino.

#### *3.2.2.1. Normativa*

ASTM C 1252 – AASHTO T 304

#### *3.2.2.2. Definición*

La angulosidad del agregado fino se define como el porcentaje de vacíos del agregado compactado libremente, medido bajo el Método A por la Asociación Nacional de Agregado. Éste método cumple para agregados que pasan el tamiz No. 8 (2.36mm).

#### *3.2.2.3. Significado y uso*

Determinar la aceptabilidad del agregado fino en laboratorio durante el diseño de mezclas asfálticas para asegurar que la muestra de agregado tenga la suficiente angulosidad, textura o ambos mejorando la fricción interna de la mezcla para que pueda resistir deformaciones permanentes (hundimientos). La arena natural, aunque es parte de los finos, es considerada indeseable debido a que presenta en su mayor parte forma redondeada.

#### *3.2.2.4. Metodología*

Mezclar las muestras de agregado homogéneamente y colocarlas en el recipiente cónico tapando la abertura inferior con un dedo. Enrazar el material y liberar la abertura permitiendo que el agregado caiga libremente al cilindro de cobre de 100mL. Remover el excedente que quede en el cilindro enrazando con la espátula ligeramente y registrar la masa total. Calcular el volumen del recipiente cónico y con estos datos se procede al cálculo de vacíos de compactación libre del material para representar su angulosidad. (ASTM C1252, 2017)

#### *3.2.3. Ensayo para la determinación de partículas planas y alargadas.*

##### *3.2.3.1. Normativa*

ASTM D 4791

##### *3.2.3.2. Definición*

Partículas planas y alargadas son definidas como el porcentaje por peso de las partículas de agregado grueso que tengan una relación longitud-espesor mayores a 5. Las partículas planas se encuentran típicamente en relación ancho-espesor 5:1 o 3:1, manteniendo el mismo criterio para las partículas alargadas, pero con relación longitud-ancho.

##### *3.2.3.3. Significado y uso*

Determinar la aceptabilidad del agregado grueso en laboratorio durante el diseño de mezclas asfálticas, ya que cuando la carga es aplicada en la parte alargada de la partícula disminuye su resistencia; también contribuyen a la segregación y rotura del agregado durante la compactación.

#### *3.2.3.4. Metodología*

Separar las masas de agregado como indica la norma, dependiendo del tamaño máximo de agregado, secar y dividir las partículas en 4 grupos: (1) partículas planas, (2) partículas alargadas, (3) partículas que cumplan con los criterios del grupo (1) y (2), (4) partículas que no cumplen con los criterios del grupo (1) y (2). Al ya tener los grupos separados, utilizar el calibrador proporcional, posicionando la abertura correcta para cumpla con los criterios de los grupos (1) y (2). (ASTM D4791, 2010)

#### 3.2.4. Ensayo para la determinación del contenido de Arena.

##### *3.2.4.1. Normativa*

ASTM D 2419 – AASHTO T 176

##### *3.2.4.2. Definición*

El contenido de arena se mide usando la prueba de equivalente de arena para materiales finos que pasan el tamiz No. 4 (4.75mm).

##### *3.2.4.3. Significado y uso*

El equivalente de arena es usado para identificar la cantidad de arcilla de una muestra de agregado fino, pudiendo estas cubrir de tal forma, que el recubrimiento de asfalto se adhiera a las partículas de arcilla en lugar a las del agregado y en presencia de humedad el asfalto tienda a separarse, dañando finalmente la mezcla asfáltica.

##### *3.2.4.4. Metodología*

Obtener por lo menos 1500 g de material que pasa el tamiz No. 4, como lo indica la norma y colocarlos en una pipeta graduada que contenga  $102 \pm 3$ mm de solución de cloruro de

calcio y colocar en el agitador mecánico por un periodo de  $45 \pm 1$ , que se demora en realizar 90 ciclos de mezclado aproximadamente; dejar reposar 20min para que las partículas que no sean arcillas se sedimenten y se lea las medidas respectivas. (ASTM D2419, 2002)

### 3.2.5. Ensayo para la determinación de la gradación de los agregados.

#### 3.2.5.1. *Normativa*

ASTM C 136 – AASHTO T 27 – INEN 696

#### 3.2.5.2. *Definición*

La gradación es expresada en términos de porcentaje que pasa una serie de tamices, utilizados en su mayoría desde el tamaño  $2 \frac{1}{2}$  in., hasta el No. 200 (75  $\mu$ m). El tamaño representa la abertura que tienen los huecos de la malla y en cuestión de números, representa el número de hilos verticales y horizontales cruzados por cada pulgada cuadrada.

#### 3.2.5.3. *Significado y uso*

Determina primordialmente la gradación de los materiales que serán utilizados como agregados. Los resultados son usados para determinar una distribución de tamaños adecuada y poder establecer puntos de control que ayuden en las relaciones que conciernen a la porosidad y el acopio de los agregados.

#### *3.2.5.4. Metodología*

Determinar la masa de muestra dependiendo del tipo de agregado (grueso y fino) y del tamaño máximo nominal (solamente para el grueso) como indica en la norma.

Con el material bien seco y a temperatura ambiente, seleccionar los tamices en secuencia que se vayan a utilizar para obtener sus pesos retenidos y tapar. Realizar movimientos oscilatorios y verticales para una mejor separación de los tamaños. Registrar las masas retenidas y calcular el porcentaje que pasa de cada tamiz. Graficar en escala logarítmica los valores del porcentaje que pasa con su respectiva abertura de tamiz. (ASTM C136, 2006)

## CAPÍTULO IV: ASFALTO AC-20

Este capítulo se basa en la comprobación de los parámetros para que el asfalto cumpla con la denominación AC-20 en base a los ensayos propuestos por la NTE INEN 2515:2010.

### 4.1. Clasificación del Asfalto por Viscosidad

La norma técnica ecuatoriana presentada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), clasifica a los cementos asfálticos de acuerdo a la viscosidad obtenida en ensayos de laboratorio. Este derivado del petróleo es utilizado como parte del material de pavimentación en la construcción y mantenimiento de carreteras.

#### 4.1.1. Ensayo para la determinación de la viscosidad absoluta.

##### 4.1.1.1. Norma

ASTM D 2171 – AASHTO T 202

##### 4.1.1.2. Definición

Es el tiempo que necesita el asfalto en estado líquido para llegar a las marcas de los tubos del viscosímetro capilar al vacío a temperatura constante de ensayo 60°C.

##### 4.1.1.3. Significado y Uso

Determinar la viscosidad del asfalto para caracterizar su comportamiento de fluidez a una temperatura constante de 60°C.

##### 4.1.1.4. Metodología

Calentar el asfalto hasta que se encuentre totalmente líquido, la cantidad necesaria depende del tipo de tubo del viscosímetro a utilizar. A la par, encender el equipo capilar

al vacío y establecer la temperatura de baño a 60°C. Al tener ambos parámetros listos, encender el equipo y de manera automática generará una presión de 40 kPa en el sistema de vacío. Registrar el tiempo que se demora en atravesar cada una de las marcas del tubo. (ASTM D2171, 2018)

Nota: la norma establece los tiempos de ensayo y los rangos de aceptación para la temperatura del baño, la presión y el llenado de las marcas en el tubo.

#### 4.1.2. Ensayo para la determinación de la viscosidad cinemática.

##### *4.1.2.1. Norma*

ASTM D 2170 – AASHTO T 201 – INEN 810

##### *4.1.2.2. Definición*

Es la relación entre la viscosidad medida en el viscosímetro rotacional (VR) y la gravedad específica del asfalto

##### *4.1.2.3. Significado y Uso*

Determinar la consistencia del asfalto líquido como un elemento para establecer la uniformidad del envío o las fuentes de suministro.

##### *4.1.2.4. Metodología*

La viscosidad cinemática de un líquido Newtoniano puede ser calculado multiplicando su gravedad específica por su viscosidad absoluta (medida con viscosímetro capilar al vacío o con el viscosímetro rotatorio), como lo indica el anexo A1. De la norma. (ASTM D2170, 2018)

### 4.1.3. Ensayo para la determinación del punto de chispa y llama.

#### 4.1.3.1. *Norma*

ASTM D 92 – AASTHO T 48 – INEN 808

#### 4.1.3.2. *Definición*

Es la temperatura a la cual se calienta el betún asfáltico para que se produzca una flama sobre su superficie. Se mide mediante la prueba de Punto de Inflamación de Copa abierta Cleveland.

#### 4.1.3.3. *Significado y Uso*

Determina el punto en el cual la temperatura es suficientemente volátil para causar una chispa instantánea (punto de chispa) y a partir de este punto generar una pequeña llama por un lapso de tiempo (punto de inflamación). Ambos parámetros pueden ser usados para identificar materiales nocivos, volátiles e inflamables que afecten la mezcla asfáltica, así como también contribuir a la máxima temperatura de combustión.

#### 4.1.3.4. *Metodología*

Llenar la copa con la muestra hasta la marca de llenado y que se encuentre en el centro del plato para calentar. Aplicar calor y controlar que la muestra no se queme, una vez alcanzado un punto elevado de temperatura, pasar la flama del dispositivo para generar una chispa y registrar la temperatura de ensayo. Una vez alcanzado la chispa, registrar la temperatura cuando al pasar la flama de manera horizontal, esta no desaparezca y se mantenga constante, caso contrario esperar a que adquiera más temperatura.

Finalmente utilizar formula de corrección debido a la presión barométrica del ambiente que se tiene en el lugar de ensayo. (ASTM D92, 2018)

#### 4.1.4. Ensayo para la determinación de la densidad de asfaltos semi sólidos.

##### 4.1.4.1. *Norma*

ASTM D 70 – AASHTO T 228

##### 4.1.4.2. *Definición*

Es la relación del peso de un material volumen conocido y el peso de igual volumen en agua, estando ambos materiales a la misma temperatura.

##### 4.1.4.3. *Significado y Uso*

Determinar la densidad y el peso específico del asfalto a utilizar permite hacer correcciones de volumen cuando éste es medido a diferentes temperaturas, ya que la mayor parte de líquidos sufren cambios de volumen cuando varía su temperatura, se expanden cuando la temperatura aumenta y se contraen cuando esta disminuye; también puede ser utilizado como componente de determinación de vacíos en la mezcla asfáltica compactadas.

##### 4.1.4.4. *Metodología*

Calentar el asfalto hasta que se encuentre totalmente líquido sin grumos y el material de volumen conocido a temperatura de ensayo, la norma establece un picnómetro normalizado en este tipo de ensayo. Al ya tener ambos en las condiciones deseadas, llenar el picnómetro con 1) agua destilada, 2) asfalto líquido hasta la marca indicada y 3) asfalto líquido y agua destilada. Registrar sus masas y realizar la operación como muestra la formula en la norma. (ASTM D70, 2018)

#### 4.1.5. Ensayo para la determinación de penetración de materiales bituminosos.

##### 4.1.5.1. *Norma*

ASTM D 5 – AASHTO T 49 – INEN 917

##### 4.1.5.2. *Definición*

Es la distancia que una aguja normalizada ingresa en el betún asfáltico en condiciones específicas de temperatura, carga y tiempo.

##### 4.1.5.3. *Significado y Uso*

Determinar la amplitud con la que el asfalto se deforma mediante un equipo mecánico con aguja normalizada, esto nos permite aproximar la consistencia relativa o dureza del asfalto y clasificarlo en uno de los 4 márgenes que se muestran a continuación: 60-70, 85-100, 120-150 y 200-300, medidos en décima de milímetro.

Nota: Las Regulaciones Técnicas MOP – 001 – F 2002 establecen solo criterios de aceptación para los márgenes 60-70 y 85-100.

##### 4.1.5.4. *Metodología*

Preparar un molde de dimensiones como especifica la norma y dejar enfriar a temperatura ambiente durante 2 horas; mientras tanto, preparar la temperatura del baño a la cual se realizará el ensayo (25°C). Una vez seca la muestra introducir en el baño para tener igualdad de temperaturas. Realizar un mínimo de 3 penetraciones con la aguja, donde su margen de distinción sea de  $\pm 0.1$ mm. (ASTM D5, 2013)

#### 4.1.6. Ensayo para la determinación del punto de ablandamiento.

##### 4.1.6.1. *Norma*

ASTM D 36 – AASHTO T 53

##### 4.1.6.2. *Definición*

Es la temperatura a la cual el bitumen de asfalto toca la parte inferior del plato normalizado, para este ensayo se utiliza el aparato de anillo y bola.

##### 4.1.6.3. *Significado y Uso*

Los asfaltos son materiales de contextura visco-elástica, donde gradualmente se hacen más suaves y menos viscosos con el incremento de la temperatura; este ensayo permite determinar la temperatura a la que los asfaltos se hacen líquidos y clasificarlos estableciendo su uniformidad, y es un indicativo de la tendencia del material a fluir en elevadas temperaturas.

##### 4.1.6.4. *Metodología*

El punto de reblandecimiento se determina mediante el método de anillo y bola. Llenar el anillo normalizado con asfalto caliente y dejar enfriar hasta que se encuentre consistente. Una vez seca la muestra se sitúa en un vaso de precipitación con agua destilada y el equipo de anillo y bola a una temperatura determinada, introducir las bolas de acero de dimensiones y pesos especificados en la norma y registrar la temperatura que alcanza el baño, cuando la bola que se encuentra sobre el anillo toque la parte inferior del plato. (ASMT D36, 2014)

#### 4.1.7. Ensayo para la determinación de la viscosidad con residuo de ensayos de película fina en horno rotatorio (RTFO).

Véase 4.1.1. utilizando el betún envejecido en horno de película delgado (RTFO).

#### 4.1.8. Ensayo de película fina en horno rotatorio.

##### *4.1.8.1. Norma*

ASTM D 2872 – AASHTO T 240

##### *4.1.8.2. Definición*

Es la cantidad de masa volátil perdida, expresada en porcentaje, que ocurre cuando una muestra de aglutinante se ensaya de acuerdo con la prueba RTFO (Rolling Thin-Film Oven)

##### *4.1.8.3. Significado y uso*

Determinar la pérdida de masa antes y después de la prueba de envejecimiento RTFO, permitiendo su cambio máximo del 1 por ciento. Estos parámetros nos indica aproximadamente los cambios de las propiedades del asfalto durante una mezcla caliente convencional, este cambio de masa es una medida de volatilidad del asfalto.

##### *4.1.8.4. Metodología*

Antes de iniciar con el ensayo se debe asegurar que la muestra prueba esté libre de agua, polvo o agentes contaminantes que puedan afectar los resultados del ensayo. Colocar  $35 \pm 0.5$ g de muestra en cada contenedor de vidrio, previendo la suficiente cantidad de material para cubrir las pruebas de caracterización que estarán basadas en el residuo. Colocar las muestras en el horno rotatorio y dejarlas ahí hasta que este realice su ciclo

completo. Retirar las botellas del horno y dejar secar a temperatura de laboratorio por un periodo de 60 minutos mínimo y 180 minutos máximo. Registrar el peso antes de colocar en el horno rotario y una vez transcurrido el tiempo de secado y enfriado de las botellas a temperatura ambiente. (ASTM D2872, 2013).

#### 4.1.9. Ensayo para la determinación de la ductilidad de materiales bituminosos.

##### *4.1.9.1. Norma*

ASTM D 113 – AASHTO T 51 – INEN 916

##### *4.1.9.2. Definición*

Es la longitud en la cual el hilo de betún asfáltico sufre rotura en condiciones de temperatura y velocidad normalizada.

##### *4.1.9.3. Significado y Uso*

La ductilidad es una característica de los cementos asfálticos muy importante debido a las propiedades aglomerantes que estos tienen, si la ductilidad es muy elevada los asfaltos son generalmente más susceptibles a los cambios de temperatura. “En algunas aplicaciones, como las mezclas para pavimentación, tienen gran importancia la ductilidad y el poder aglomerante, mientras que, en otras, como la inyección bajo losas de hormigón y el relleno de grietas, la propiedad más esencial es una baja susceptibilidad a los cambios de temperatura” (The Asphalt Institute, 1972, págs. 36-37)

##### *4.1.9.4. Metodología*

Para realizar este ensayo se debe moldear muestras de asfalto con el que se utilizará para la mezcla asfáltica final, en los equipos normalizados para esta prueba, como especifica la norma. Introducir los especímenes en el equipo mecánico lleno de agua, para que se

ambiente a la temperatura del baño, aproximadamente  $35\pm 5$ min. Una vez con los especímenes a temperatura baño, se procede a separarlos de sus moldes y colocarlos nuevamente en el equipo mecánico para iniciar el ensayo, ajustar los anillos a cada una de las partes extremas del espécimen para que estos puedan ser estirados a una velocidad constante hasta su punto de rotura.

Registrar la distancia en centímetros a la cual el espécimen haya tenido su punto de rotura.

(ASTM D113, 2017)

## CAPÍTULO V: ASFALTO PG 64-22

Este capítulo se basa en el desarrollo de los ensayos del grado PG que cumplan con el grado de desempeño 64-22, el cual es el que maneja la refinería de Esmeraldas y ha sido utilizado para el presente trabajo de investigación.

### 5.1. Clasificación del asfalto por metodología Superpave

El diseño volumétrico por Superpave de la mezcla asfáltica caliente (HMA) obliga al diseñador a seleccionar un aglutinante conformado por el grado de desempeño (PG) de acuerdo a los requerimientos de M 320, “el cual es apropiado para las condiciones climáticas y cargas de tráfico” (American Association of State Highway and Transportations Officials, 2008).

El grado de desempeño teórico que se maneja en el Ecuador corresponde al 64-22, el cual será comprobado por los parámetros de la tabla M 320-3 que se muestran a continuación.

#### **Ensayos con muestra tipo original:**

##### 5.1.1. Ensayo para la determinación del punto de chispa y llama.

Véase 4.1.3.

##### 5.1.2. Ensayo para la determinación de la viscosidad a 135°C.

###### *5.1.2.1. Norma*

ASTM D 4402 – AASHTO T 316

### *5.1.2.2. Definición*

Es la resistencia a la deformación producida por esfuerzos de corte o tracción del aglutinante asfáltico medido a altas temperaturas y revoluciones por minuto.

### *5.1.2.3. Significado y Uso*

Mide la viscosidad a alta temperatura del asfalto utilizando un viscosímetro rotacional, para determinar las temperaturas de mezcla y compactación de la mezcla asfáltica en caliente, así como también asegurar el grado de bombeo y éste pueda ser mezclado de manera satisfactoria y segura, como lo especifica la norma.

### *5.1.2.4. Metodología*

Este ensayo puede ser desarrollado para dos tipos de asfaltos: asfalto virgen (no envejecido) y asfalto envejecido por el ensayo de película fina en horno rotatorio. En ambos casos el equipo utilizado es mecánico y realiza todo el proceso, sin embargo, se debe preparar la muestra y el equipo antes de iniciar la prueba.

Para la preparación de la muestra se debe calentar el aglutinante asfáltico a ensayar hasta que se encuentre completamente líquido y no existan grumos en él. De igual manera se debe calentar el pistón que realizará los giros y medirá la viscosidad. Consultar las cantidades que se necesitan en el equipo que se ha adquirido para la prueba.

Los parámetros a obtener son: la temperatura de mezclado y la temperatura de compactación, para las cuales se deben registrar 1) la temperatura de prueba, 2) la viscosidad registrada en el equipo mecánico, 3) la velocidad en RPM y 4) el torque realizado por el viscosímetro en porcentaje. (ASTM D4402, 2015)

### 5.1.3. Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.

#### 5.1.3.1. *Norma*

ASTM 7175 – AASHTO T 315

#### 5.1.3.2. *Definición*

La reología es el estudio de la fluencia de la materia, principalmente en estado líquido, con el fin de evaluar la relación entre el esfuerzo y la deformación o las deformaciones plásticas en la mezcla asfáltica.

#### 5.1.3.3. *Significado y Uso*

Determinar la relación entre esfuerzo cortante y el torque del aglutinante asfáltico basado en los parámetros: 1)  $G^*$ , denominado módulo complejo, siendo este la rigidez al corte y 2)  $\delta$ , denominado ángulo de fase, que es determinado por el tiempo transcurrido entre la aplicación del esfuerzo (torque) y el esfuerzo cortante resultante (ángulo de rotación) en un ensayo de esfuerzo controlado. Conocer estos valores permite minimizar la rotura y controlar la fatiga del aglutinante, en estado original, después de haber sido envejecido en horno de película delgada (RTFO) y en cámara a presión (PAV).

#### 5.1.3.4. *Metodología*

El equipo mecánico se encarga de realizar todos los procesos para la obtención de los parámetros, sin embargo, se deben hacer unos pasos previos para que el ensayo pueda ser completado.

Dependiendo del tipo de muestra, original o envejecida, se eligen los discos rotatorios especificados en la norma y se los calienta a la temperatura que se los desee ensayar. Una vez con la temperatura alcanzada se coloca la muestra en estado sólido sobre los platos

para que esta se funda y cubra completamente el plato superior. Al estar completamente derretida, se pone a iniciar el equipo automático, el cual bajará el pistón y registrará de manera automática los valores del módulo de corte y el ángulo de fase.

Importante: se debe tener el software del equipo DSR para que el equipo pueda aportar con todos los datos necesarios para el cálculo automático de los parámetros requeridos. (ASTM D7175, 2015)

### **Ensayos con muestra tipo RTFO:**

5.1.4. Ensayo de película fina en horno rotatorio.

Véase 4.1.8.

5.1.5. Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.

Véase 5.1.3. utilizando el betún envejecido en horno de película delgada (RTFO).

### **Ensayos con muestra tipo PAV:**

5.1.6. Ensayo para la determinación de las propiedades reológicas del asfalto.

Véase 5.1.3. utilizando el betún envejecido en cámara a presión (PAV).

5.1.7. Ensayo para la determinación de la rigidez de fluencia a flexión del asfalto.

*5.1.7.1. Norma*

ASTM D 6648 – AASHTO T 313

#### *5.1.7.2. Definición*

Es la relación entre la tensión a flexión y la deformación a la flexión de la muestra de asfalto medido a bajas temperaturas.

#### *5.1.7.3. Significado y Uso*

Determinar el valor de la pendiente de la curva logarítmica Esfuerzo vs. Tiempo, del ensayo de fluencia a flexión mediante el reómetro de viga a flexión, conocido como el valor  $m$ , en el cual, durante su ensayo, la viga y la plataforma de medición se encuentran en un baño frío, manteniendo la misma temperatura durante todo el ensayo, minimizando las deflexiones causadas por la masa de la viga.

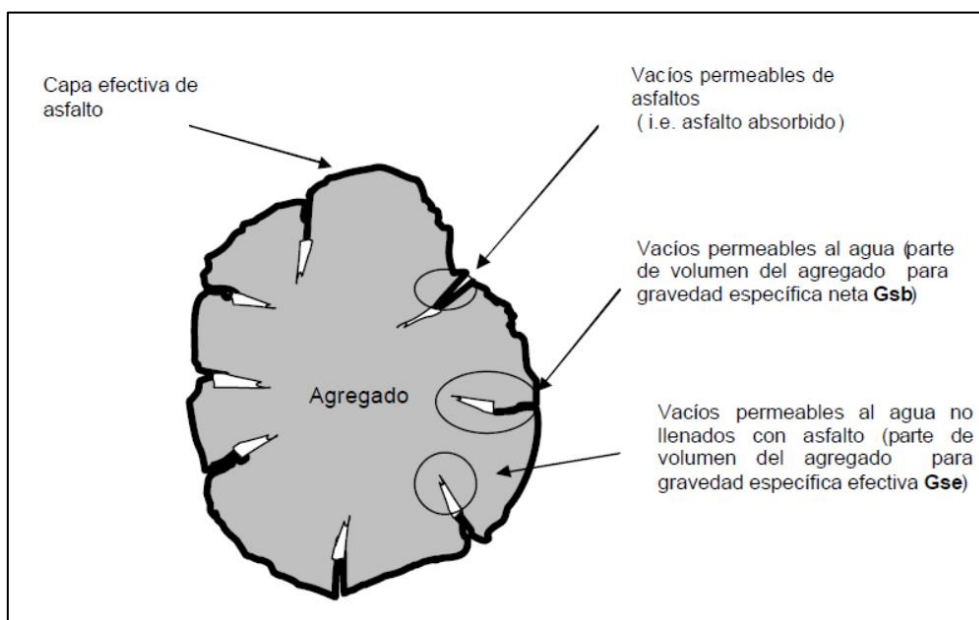
#### *5.1.7.4. Metodología*

El equipo mecánico se encarga de realizar todos los procesos para la obtención de los parámetros, sin embargo, se deben hacer unos pasos previos para que el ensayo pueda ser completado. Moldear unas vigas de asfalto con las medidas establecidas en la norma y junto a unas vigas metálicas normalizadas introducir en el equipo para poder dar inicio al ensayo. Con el software instalado en el computador, el proceso y los datos serán proporcionados automáticamente. Importante: si al tiempo de 60 seg, el valor de la pendiente no cumple el parámetro realizar un ensayo  $6^\circ$  sobre y  $6^\circ$  bajo la temperatura previamente ensayada. (ASTM D6648, 2016)

## CAPÍTULO VI: PARÁMETROS VOLUMÉTRICOS

El comportamiento de una mezcla asfáltica radica en las relaciones volumétricas entre el contenido de asfalto y el componente de agregados, o simplificando, los parámetros volumétricos; estas propiedades [vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos con asfalto (VFA), y contenido de asfalto efectivo ( $P_{be}$ )] entregan ciertas indicaciones del rendimiento del pavimento. Las definiciones y procedimientos analíticos que son descritos en este capítulo son importantes para la toma de decisiones durante la selección de la mezcla asfáltica de diseño.

El agregado mineral es poroso, tiene la capacidad de retener agua en sus aberturas microscópicas, que, en una mezcla asfáltica ya colocada en sitio, perjudica al desempeño del pavimento cuando se tiene cambios de temperatura, provocando fisuras en el pavimento.



*Ilustración 6.1 Parámetros de Diseño Volumétrico*

(Instituto Mexicano Del Transporte, 2005, pág. 8)

## 6.1. Contenido inicial de asfalto en la mezcla asfáltica

### 6.1.1. Gravedad específica Bulk del agregado, $G_{sb}$

La gravedad específica Bulk o neta, es el cociente entre una masa al aire de volumen conocido y temperatura específica de material permeable, con respecto a la diferencia entre la misma masa parcialmente saturada y la masa sumergida en agua destilada.

$$G_{sb} = \frac{M_s}{M_{SSS} - M_{Sum}}$$

*Ecuación 6.1 Gravedad específica Bulk del agregado*

Dónde:  **$M_s$**  = Masa seca

**$M_{SSS}$**  = Masa saturada con superficie seca

**$M_{sum}$**  = Masa sumergida

### 6.1.2. Gravedad específica aparente del agregado, $G_{sa}$

La gravedad específica aparente, es el cociente entre una masa al aire de volumen conocido y temperatura específica de material permeable, con respecto a la misma masa sumergida en agua destilada.

$$G_{sa} = \frac{M_s}{M_{Sum}}$$

*Ecuación 6.2 Gravedad específica aparente del agregado*

### 6.1.3. Gravedad específica efectiva del agregado, $G_{se}$

La gravedad específica efectiva, es la gravedad específica neta que excluye los vacíos permeables de asfalto.

$$Gse = Gsb + C * (Gsa - Gsb)$$

*Ecuación 6.3 Gravedad específica efectiva del agregado*

Dónde: **C** = constante que depende del grado de absorción del agregado. El valor tipo es 0.8, sin embargo, se puede utilizar 0.6 o 0.5 si el agregado tiene alto grado de absorción. (American Association of State Highway and Transportations Officials, págs. R 35-14)

#### 6.1.4. Contenido de asfalto inicial, Pbi

Conociendo los vacíos permeables del agregado se puede determinar la cantidad de asfalto que absorberá y el volumen de asfalto efectivo que se necesitará por cantidad de material a utilizar. El contenido inicial de asfalto depende de las gravedades específicas mencionadas anteriormente ( $Gsb$ ,  $Gsa$ ,  $Gse$  y  $Gb$ ), del volumen de asfalto absorbido ( $Vba$ ), de la cantidad de agregado que alcanza en  $1\text{cm}^3$  ( $Ws$ ) y el volumen efectivo de asfalto ( $Vbe$ ). La norma AASHTO R 35 especifica 4 porcentajes de ensayo para la selección del contenido de asfalto final: 1) con el contenido de asfalto inicial, 2) 0.5% bajo el inicial, 3) 0.5% sobre el inicial y 4) 1.0% bajo el inicial, sin embargo, en caso de no cumplir con el  $Va = 4.0\%$ , se puede aumentar la cantidad de ensayos.

$$Pbi = 100 * \left( \frac{Gb * (Vbe + Vba)}{(Gb * (Vbe + Vba)) + Ws} \right)$$

*Ecuación 6.4 Contenido de asfalto inicial*

##### 6.1.4.1. Cantidad de agregado en $1\text{cm}^3$

$$Ws = \frac{Ps * (1 - Va)}{\frac{Pb}{Gb} + \frac{Ps}{Gse}}$$

*Ecuación 6.5 Cantidad de agregado en  $1\text{cm}^3$*

Dónde: **Pb** = Porcentaje en masa del asfalto, asumir 0.05;

**Ps** = Porcentaje en masa del agregado, asumir 0.95;

**Va** = Volumen de vacíos de aire, asumir 0.04 cm<sup>3</sup> en 1 cm<sup>3</sup> de la mezcla.

Nota: La estimación de los cálculos del volumen de asfalto absorbido en el agregado son enfocados a un contenido de vacíos de aire del 4.0%. (American Association of State Highway and Transportations Officials, págs. R 35-15)

#### *6.1.4.2. Volumen de asfalto absorbido*

$$Vba = Ws * \left( \frac{1}{Gsb} - \frac{1}{Gse} \right)$$

*Ecuación 6.6 Volumen de asfalto absorbido*

#### *6.1.4.3. Volumen efectivo de asfalto*

Es el volumen de aglutinante asfáltico que no es absorbido en el agregado,

$$Vbe = 0.176 - [0.0675 * \log(Sn)]$$

*Ecuación 6.7 Volumen efectivo de asfalto*

Dónde: **Sn** = Tamaño máximo nominal del tamiz del agregado más grande de la mezcla.

Los parámetros propios de la mezcla, como los vacíos de aire (Va) y los vacíos en el agregado mineral (VMA) se representan en porcentaje, los vacíos llenos de asfalto (VFA) por otra parte son el porcentaje del VAM llenado con asfalto efectivo (Pbe) y debido a que estos tres son cantidades de volumen, la mezcla tiene que ser diseñada o desarrollada sobre la base del volumen, sin embargo, para proveer una mezcla de diseño, estos parámetros volumétricos pueden ser cambiados a valores de masa. (Instituto Mexicano Del Transporte, 2005, pág. 9)

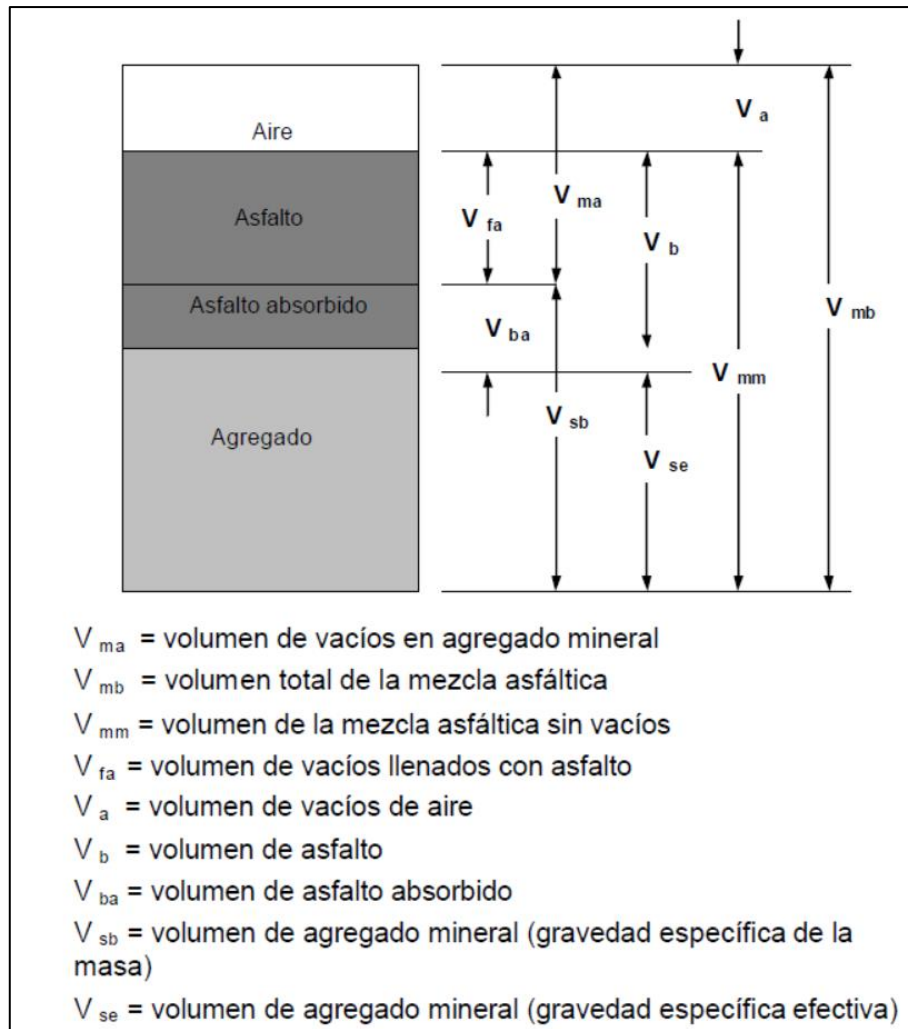


Ilustración 6.2 Componente del Diagrama de Compactación de una HMA.

(Instituto Mexicano Del Transporte, 2005, pág. 9)

## 6.2. Vacíos de aire en la mezcla asfáltica, $V_a$

Es el volumen total de aire entre las partículas de agregado recubiertas a lo largo de la mezcla compactada, se expresa en porcentaje del volumen Bulk de la mezcla compactada.

$$Va = 100 * \left( 1 - \left( \frac{Gmb}{Gmm} \right) \right)$$

Ecuación 6.8 Vacíos de aire en la mezcla asfáltica

Dónde:  $Gmb$  = Gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica compactada,

$Gmm$  = Gravedad específica máxima teórica de la mezcla asfáltica suelta.

## 6.2.1. Gravedad específica máxima teórica, Gmm

### 6.2.1.1. *Norma*

ASTM D 2041 – AASHSTO T 209

### 6.2.1.2. *Definición*

Es el cociente de la masa seca suelta al aire de la mezcla asfáltica y de la diferencia de la masa del espécimen bajo el agua y la masa del contenedor.

### 6.2.1.3. *Significado y Uso*

Este método describe los ensayos para la determinación de la gravedad específica máxima teórica y densidad de mezclas de pavimentos bituminosos, siendo fundamentales para calcular las cantidades de agregado y material bituminoso de la mezcla.

### 6.2.1.4. *Metodología*

Preparar la cantidad de material a ensayar dependiendo del tamaño máximo de agregado, mezclar con el contenido de asfalto inicial y dejar secar a temperatura ambiente sin que las partículas finas se conglomeren unas con otras, dejar lo más suelto que se pueda. Una vez enfriada la mezcla introducir en el equipo mecánico que realiza movimientos oscilatorios en ambos sentidos. Retirar del equipo, introducir agua sin que se produzcan burbujas de aire. La temperatura del baño debe encontrarse a  $25 \pm 1$  °C. Al terminar el ensayo desechar el material, ya que no sirve para volver a ensayar ni para ningún otro.  
(ASTM D2041, 2011)

### 6.2.2. Gravedad específica Bulk, Gmb

Véase 6.1.1., pero utilizar la mezcla asfáltica compactada para la realización de los cálculos.

### 6.3. Vacíos en el agregado mineral, VMA

Es el volumen de la mezcla asfáltica compactada no ocupada por el agregado cuando el volumen de agregado es calculado usando gravedad específica Bulk.

$$VMA = 100 * \left\{ 1 - \left[ \frac{Gsb}{Gse} * \left( 1 - \frac{Pbi}{100} \right) \right] \right\}$$

*Ecuación 6.9 Vacíos en el agregado mineral*

### 6.4. Vacíos llenos de asfalto en la mezcla asfáltica, VFA

Es el porcentaje de VMA llenos con aglutinante asfáltico. Es el volumen de asfalto efectivo dividido para los vacíos en el agregado mineral.

$$VFA = 100 * \left( \frac{VMA_{\text{corregido}} - Va}{VMA_{\text{corregido}}} \right)$$

*Ecuación 6.10 Vacíos llenos de asfalto en la mezcla asfáltica*

Dónde:  $VMA_{\text{corregido}}$  = es la corrección de los vacíos del agregado mineral, en dos condiciones:

- 1) Si  $Va > 4.0\%$ , entonces  $VMA = 0.2 * (4.0 - Va)$  y
- 2) Si  $Va < 4.0\%$ , entonces  $VMA = -0.1 * (4.0 - Va)$ .

## 6.5. Contenido de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica, $P_{be}$

Es la diferencia entre el volumen total de asfalto y la cantidad perdida por absorción de las partículas del agregado. Es la cantidad de asfalto que se queda en la parte exterior del agregado, formando una capa exterior, la cual gobierna el desempeño de la mezcla asfáltica.

$$P_{ba} = -(P_s * G_b) * \left( \frac{G_{se} - G_{sb}}{G_{se} * G_{sb}} \right) + P_{b_{est}}$$

*Ecuación 6.11 Contenido de asfalto efectivo en la mezcla asfáltica*

Dónde:  $P_{b_{est}}$  = cantidad de asfalto estimado:

$$P_{b_{est}} = P_{bi} - 0.4 * (4 - V_a)$$

*Ecuación 6.12 Cantidad de asfalto estimado*

## 6.6. Proporciones de polvo, DP

Se define como el porcentaje por peso del cociente del material que pasa el tamiz No. 200 (75  $\mu$ m) y el porcentaje de aglutinante asfáltico efectivo.

$$DP = \frac{P_{0.075}}{P_{b_{est}}}$$

*Ecuación 6.13 Proporciones de polvo*

Dónde:  $P_{0.075}$  = porcentaje que pasa del tamiz No. 200 (0.075mm)

## 6.7. Módulo de rigidez

### 6.7.1.1. Norma

UNE EN: 12697-26 ANEXO C

### *6.7.1.2. Definición*

Es la relación entre la carga vertical aplicada por el equipo mecánico y la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga.

### *6.7.1.3. Significado y Uso*

La determinación del módulo de rigidez permite dimensionar la estructura del pavimento en el diseño, rehabilitación o refuerzo. Con este parámetro se puede prevenir daños o fallas, tanto en la carpeta asfáltica como en la estructura del pavimento en conjunto, como fisuras, grietas deformaciones y fatigas.

### *6.7.1.4. Metodología*

Para poder realizar el ensayo es necesario que los especímenes (de mezcla asfáltica, realizados en laboratorio o extraídos de la carpeta asfáltica existente) tengan un diámetro nominal de 80mm, 100mm, 120mm, 150mm o 200mm  $\pm 5$ mm respectivamente y una altura de 70mm  $\pm 5$ mm y no menor a 30mm.

Las temperaturas de ensayo recomendadas son 2°C, 10°C y 20°C, sin embargo, otras temperaturas también pueden ser adoptadas para su prueba. Se ha registrado que conforme incrementa la temperatura de ensayo existe una excesiva deformación que empuja a la briqueta al colapso o fallo. El condicionamiento de temperatura debe realizarse tanto para el equipo mecánico como para el testigo a ensayar.

Una vez obtenido todo lo anterior, se procede a introducir el espécimen en una máquina que mida el esfuerzo a tensión indirecta, colocándola como se muestra en la figura \_\_\_\_. En seguida, se procede a iniciar el software en el ordenador el cual tiene programada la norma UNE EN 12697 26 que facilita el cálculo de resultados e indicando el proceso a seguir, descrito a continuación:

- Bajar el pistón hasta que toque la barra horizontal la cual transmite el esfuerzo a la briqueta.
- Colocar los LVDT (Linear Variable Differential Transformer) en posición para poder medir las deformaciones que sufrirá durante el proceso.
- Comenzar los ciclos de carga (automático) que simulen un esfuerzo indirecto entre 1500 y 3000MPa.

Culminada esta parte del ciclo, se debe girar el espécimen  $90 \pm 10^\circ$  y volver a realizar los pasos mencionados anteriormente. (UNE EN 12697-26, 2004, págs. 26-34)

Al terminar el ensayo se debe verificar los siguientes requisitos para cumplir la norma.

- ✓ El factor de carga de área del ensayo debe ser  $0.60 \pm 0.10$ .
- ✓ La Deformación horizontal diametral debe ser menor a  $20\mu\text{m}$  y mayor a  $3\mu\text{m}$ .
- ✓ El esfuerzo vertical debe ser mayor a  $0.5\text{kN}$ .
- ✓ Si el coeficiente de Poisson no se determina automáticamente, asumir  $0.35$ .
- ✓ La diferencia de módulos de la parte B con respecto a la parte A debe ser  $+10\%$  o  $-20\%$ , caso contrario, rechazar el ensayo.

En caso de no utilizar un equipo automático, se calcula el módulo de rigidez con la fórmula que se muestra a continuación:

$$S_m = \frac{F \times (v + 0.27)}{z \times h}$$

*Ecuación 6.14 Módulo de rigidez*

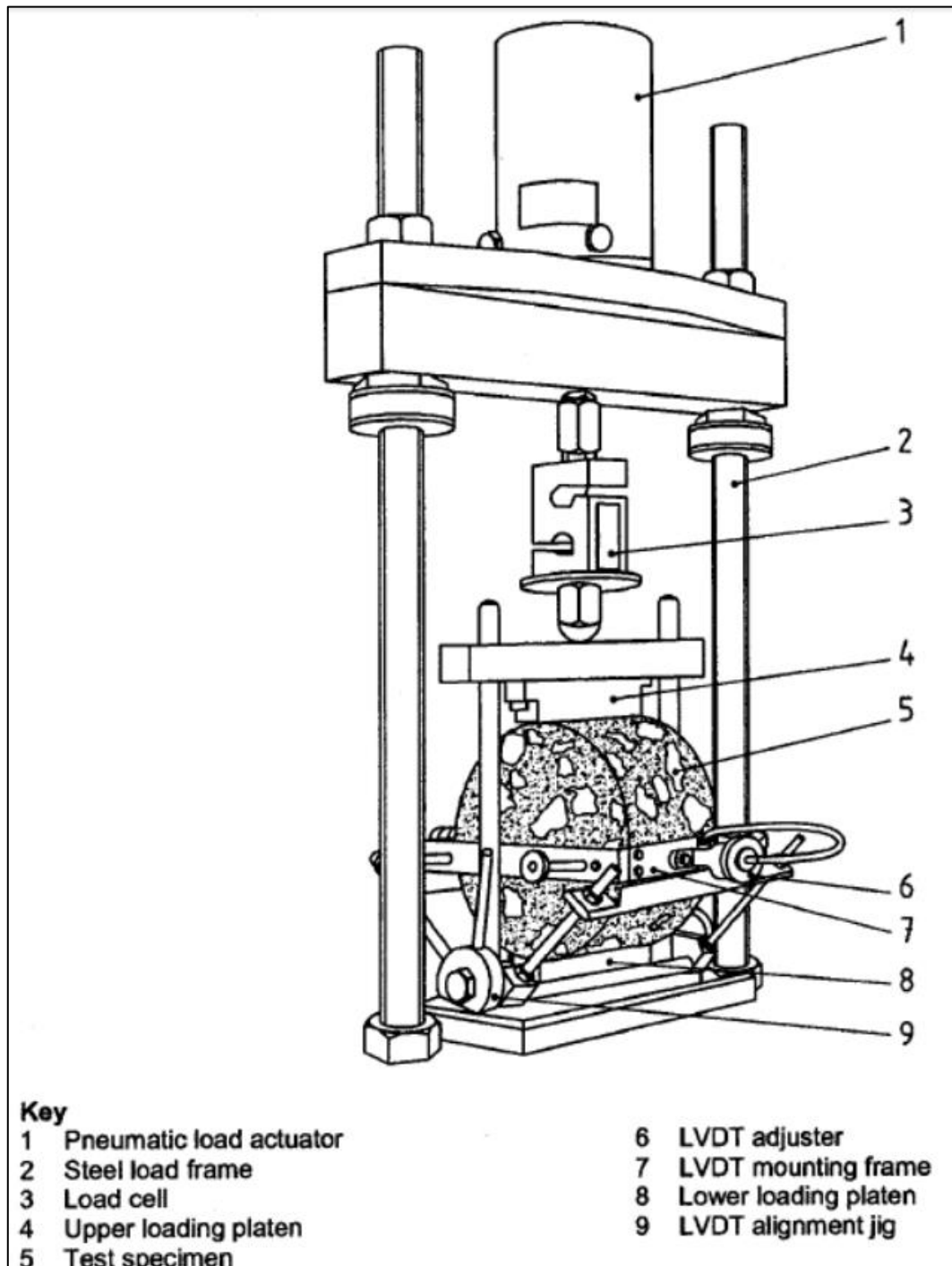
Dónde:  $S_m$  = módulo de rigidez, expresado en mega-pascales (MPa);

$F$  = valor pico de la carga vertical aplicada, expresada en Nnewtones (N);

$z$  = amplitud de la deformación horizontal, expresada en milímetros (mm);

$h$  = altura del espécimen, expresada en milímetros (mm);

$\nu$  = coeficiente de Poisson.



*Ilustración 6.3 Ejemplo del Dispositivo de Ensayo para Módulo de Rigidez*

## CAPÍTULO VII: CÁLCULOS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se muestra los cálculos descritos en los capítulos anteriores, referente a la caracterización de los materiales, del asfalto AC-20 (requerimiento INEN), grado de desempeño del asfalto (requerimiento diseño Superpave) y ensayo mecánico realizado a la mezcla asfáltica compactada (módulo de rigidez).

### 7.1. Agregado mineral

El material pétreo que se utilizó para la evaluación de la mezcla asfáltica fue extraído de la cantera de Guayllabamba, ubicada 29 km al Nor-este de la ciudad de Quito, los ensayos al agregado se realizaron de acuerdo a la metodología Superpave; para ello se ha seleccionado una carga de diseño de un solo eje equivalente (ESALs) de 10 a 30 millones, parámetro fundamental en Superpave. El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

<b>Propiedades de consenso</b>					
Descripción:	Norma	Unidad	Requisito		Dato ensayado
			Mínimo	Máximo	
Fractura del agregado grueso	ASTM D 5821	%	Mín 1 Cara fract. 95	Mín 2 caras fract 90	1 cara fract. 2 caras fract. 96 94
Partículas alargadas	ASTM D 4791	%	-	10	11.00
Equivalente de arena	ASTM D 2419	%	45	-	38.00
<b>Propiedades de origen</b>					
Descripción:	Norma	Unidad	Requisito		Dato ensayado
			Mínimo	Máximo	
Desgaste de Los Ángeles	ASTM C 131	%	-	35	35.00
Intemperismo acelerado	ASTM C 88	%	-	10	1.50
Materiales deletéreos	ASTM C 142	%	1 a 3/4	1	3.3
			3/4 a 3/8	1	9.3
			3/8 a 4	1	2

*Tabla 7.1 Resumen de resultados del Agregado Mineral*

### 7.1.1. Dosificación de la mezcla de agregados pétreos

La cantera de Guayllabamba posee tres tipos de agregados que se utilizaron para definir la estructura del agregado mineral y definir la granulometría de la mezcla por medio de sus combinaciones en las siguientes proporciones:

Material tipo	% en la Mezcla
Grueso (3/4 - 3/8)	20
Medio (1/2 - No. 4)	35
Fino (Pasa No. 4)	45
Total	100

*Tabla 7.2 Dosificación de la Mezcla de Agregados*

### 7.1.2. Graduación

La curva granulométrica que se presenta a continuación está conformada por la mezcla de agregados indicados anteriormente y los requerimientos Superpave citados en el capítulo 2. Los puntos de control corresponden al tamaño máximo de agregado, en este caso 19mm y zona de restricción ubicada entre los tamaños 2.36 y 0.3mm.

**Nota:** las tablas guías para los puntos de control, límites de la zona de restricción y porcentajes que pasa admitidos, se encuentran descrito en el capítulo II.

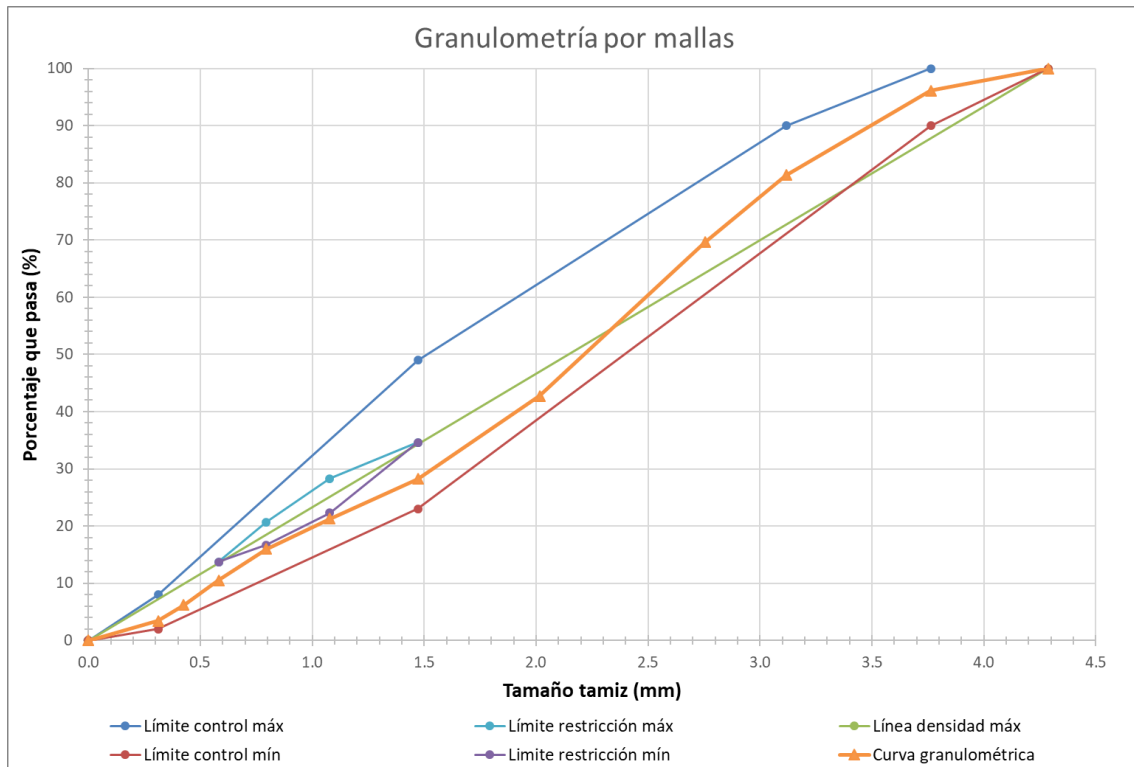


Ilustración 7.1 Granulometría por mallas del Agregado Mineral

## 7.2. Aglutinante asfáltico

El asfalto utilizado en este trabajo fue caracterizado mediante dos parámetros, el fundamental para la metodología Superpave: por su grado de desempeño y el requerido en Ecuador: por su viscosidad.

Nota: \*\* Para el cálculo del índice de penetración (requerimiento INEN) se utilizó la fórmula establecida en la norma:

$$IP = \frac{20 - 10 * A}{A + 1}$$

Ecuación 7.1 Índice de Penetración

$$A = \frac{\log 800 - \log \text{penetración prom}}{\text{Pto. ablandamiento} - 25}$$

Ecuación 7.2 Variable dependiente para el índice de penetración

### 7.2.1. Asfalto clasificado por su viscosidad.

El cemento asfáltico utilizado en esta disertación tiene una clasificación AC-20, como lo especifica la INEN 2:515 2010, proviene de la refinera de Esmeraldas, sin aditivos modificantes y en estado virgen para ser utilizado en todos los ensayos. El resumen de resultados con sus respectivos límites se muestra a continuación:

Grado de viscosidad: <b>AC-20</b>					
Descripción:	Norma	Unidad	Requisito		Dato ensayado
			Mínimo	Máximo	
Viscosidad Absoluta 60°C	ASTM D2171	Pa.s	160	240	234.2
Viscosidad cinemática 135°C	ASTM D2170	mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	300	--	249.84
Punto de inflamación	ASTM D92	°C	232	--	327
Gravedad específica 25°C	ASTM D70	S/U	Dato informe		1.01
Índice de penetración	**	S/U	-1.5	1.0	-0.6
Residuo de ensayo de película fina en horno rotatorio (RTFO):					
Viscosidad 60°C	ASTM D2171	Pa.s	--	800	1022.7
Cambio de masa	ASTM D2872	%	--	1%	0.011%
Ductilidad a 25°C	ASTM D113	cm	50	--	51.0

Tabla 7.3 Resumen de resultados del Asfalto Clasificado por su Viscosidad

### 7.2.2. Asfalto clasificado por su grado de desempeño

La norma AASHTO M 320 clasifica al asfalto por su máximo grado de desempeño a altas y bajas temperaturas, dando como resultado un grado PG 64-22. El resumen de resultados con sus respectivos límites se muestra a continuación:

Grado de desempeño: <b>PG 64-22</b>					
Descripción:	Norma	Unidad	Requisito		Dato ensayado
			Mínimo	Máximo	
<b>Tipo de muestra: Original</b>					
Punto de inflamación	ASTM D92	°C	230	--	327
Viscosidad a 135°C	ASTM D4402	Pa.s	--	3.0	0.24
Corte Dinámico	ASTM D7175	kPa	1.0	--	1.06
<b>Tipo de muestra: RTFO</b>					
Cambio de masa	ASTM D2872	%	--	1%	0.011%
Corte Dinámico	ASTM D7175	kPa	2.20	--	3.96
<b>Tipo de muestra: PAV</b>					
Corte Dinámico	ASTM D7175	kPa	--	5000	1660
Fluencia a flexión	(Rigidez) ASTM D6648 (Valor m)	MPa S/U	-- 0.30	300 --	110.33 0.32

Tabla 7.4 Resumen de resultados del Asfalto Clasificado por su Grado de Desempeño

### 7.3. Temperatura de mezclado y compactación

Para asegurar una mezcla asfáltica mejorada, se debe conocer las temperaturas a las cuales el asfalto y el agregado mineral trabajan de manera óptima, es por esto que se debe construir una carta de viscosidad, que determine las temperaturas de mezclado y compactación, en rangos de  $0.17 \pm 0.02$  y  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s, respectivamente. Para su elaboración se utiliza el ensayo con viscosímetro rotacional (RV), descrito en el capítulo V. Los resultados obtenidos son: temperatura de mezclado= $154^{\circ}\text{C}$  y temperatura de compactación= $143^{\circ}\text{C}$ . El resultado gráfico se muestra a continuación:

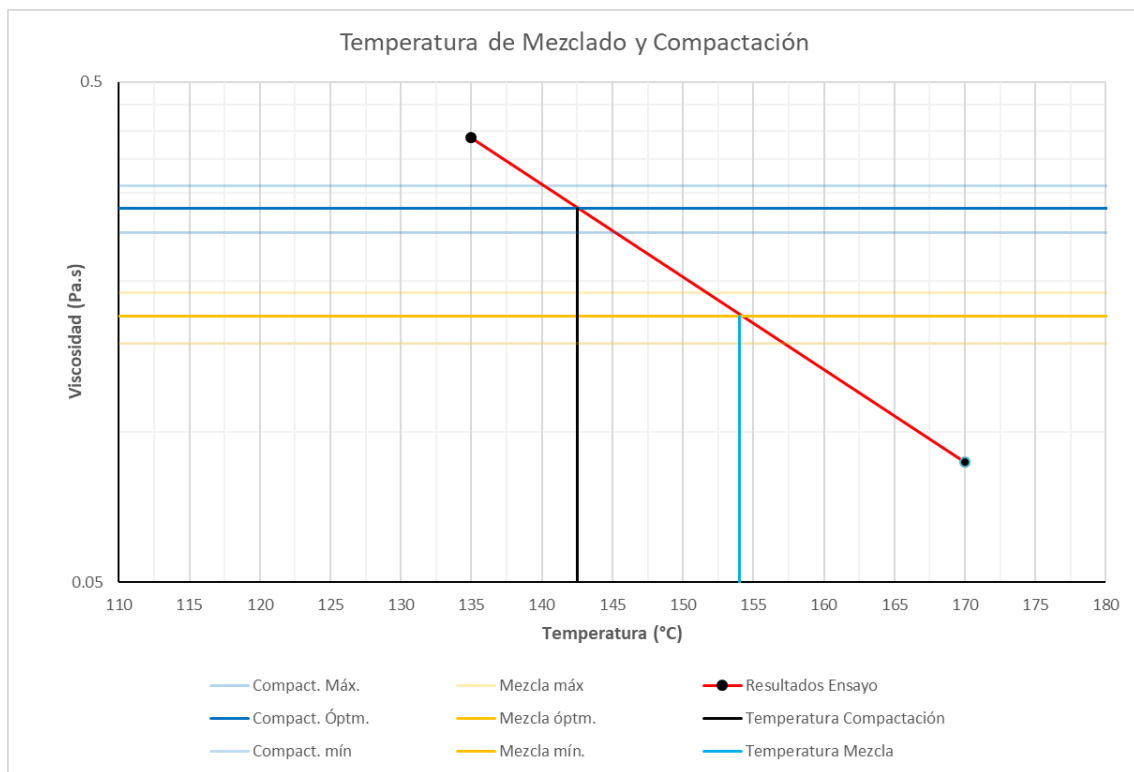


Ilustración 7.2 Temperatura de Mezclado y Compactación

### Características de la mezcla asfáltica

Los parámetros volumétricos de la mezcla asfáltica son importantes para poder predecir el comportamiento que tendrá el pavimento a lo largo su vida útil. Un resumen de los datos obtenidos se presenta en las tablas a continuación:

#### 7.4. Contenido inicial del aglutinante

Contenido inicial estimado de aglutinante para la carpeta asfáltica (Pbi)	
<b>Datos</b>	
Gb asfalto	1.01
Tam. Máx. agregado (mm)	19
Gsb agregado	2.37
Gsa agregado	2.63
<b>Cálculos</b>	
Gse (Mezcla)	2.50
Ws (Agregado)	2.12
Vba (Asfalto)	0.05
Vbe (Asfalto)	0.09
Pbi	6.10

*Tabla 7.5 Parámetros para Estimar el Contenido de Aglutinante de Diseño*

#### 7.5. Contenido de aglutinante de diseño para la mezcla asfáltica

Con el porcentaje de asfalto inicial previamente indicado, se procede a obtener los parámetros volumétricos con los diferentes porcentajes de asfalto, explicados en 6.1.5; sin embargo, para alcanzar el requerimiento de vacíos al 4.0% se debieron ensayar dos muestras más con porcentajes +1.5% y +2.0% del contenido inicial de aglutinante asfáltico, también la norma indica en la sección 9 las fórmulas para el ajuste de dichos parámetros en el porcentaje de vacíos requerido. El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

Contenido de aglutinante de diseño para la mezcla asfáltica								
Propiedad volumétrica	Muestra						Requisito	
	1	2	3	4	5	6	Mín	Máx
Parámetros volumétricos iniciales								
Pbi	5.6	6.1	6.6	7.1	7.6	8.1	---	
Gmm	2.44	2.41	2.38	2.36	2.33	2.31	---	
Gmb	2.21	2.22	2.23	2.25	2.26	2.27	---	
% Va	9.5	7.9	6.2	4.6	3.2	1.8	---	
% VMA	16.6	16.4	16.5	16.2	16.5	16.5	---	
Ajuste para alcanzar el aglutinante de diseño (Va = 4.0% al N diseño)								
Δ Va	-5.5	-3.9	-2.2	-0.6	0.8	2.2	---	
Δ Pb	2.2	1.6	0.9	0.2	-0.3	-0.9	---	
Δ VMA	-1.1	-0.8	-0.4	-0.1	-0.1	-0.2	---	
Características de la mezcla asfáltica ajustadas al %Va (AASHTO R35)								
Pb. Est. Diseño	7.8	7.7	7.5	7.3	7.3	7.2	---	
% Va	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	---
% VMA	15.5	15.6	16.0	16.1	16.5	16.3	13	---
% VFA	42.9	49.4	61.6	71.4	80.3	88.8	65	75
DP	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	1.2
% Gmm inicial	88.0	87.8	86.9	86.9	86.1	85.8	---	89
% Gmm diseño	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96	---
% Gmm final	97.4	97.3	97.5	97.5	97.6	97.6	---	98

Tabla 7.6 Resumen de resultados del Contenido de Aglutinante de diseño

## Representaciones gráficas de los valores obtenidos anteriormente

### 7.5.1. Contenido de Vacíos Vs. Porcentaje de Asfalto

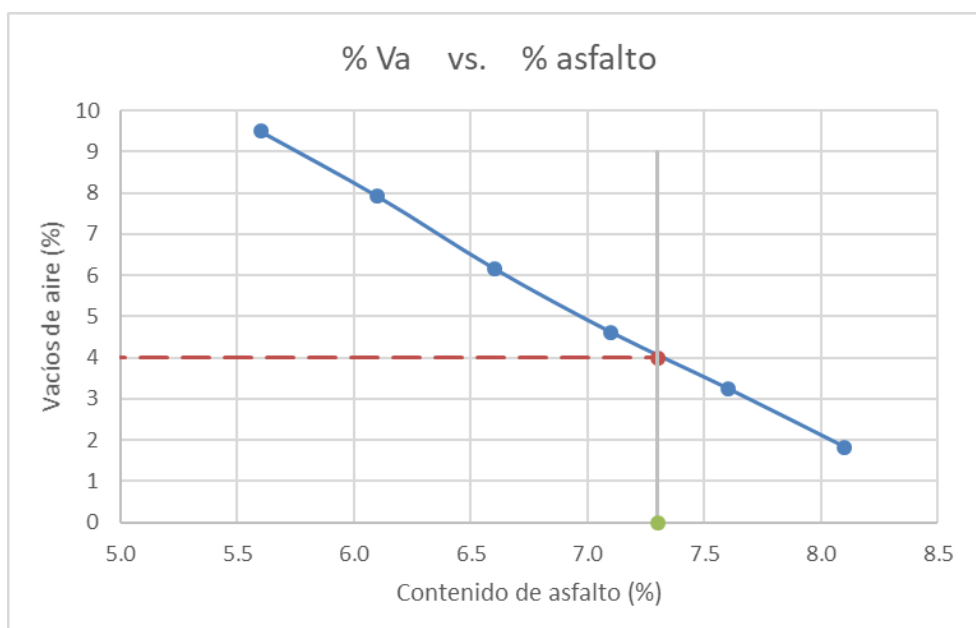


Ilustración 7.3 Gráfica %Va vs. %Asfalto

7.5.2. Vacíos en el Agregado Mineral vs. Porcentaje de Asfalto

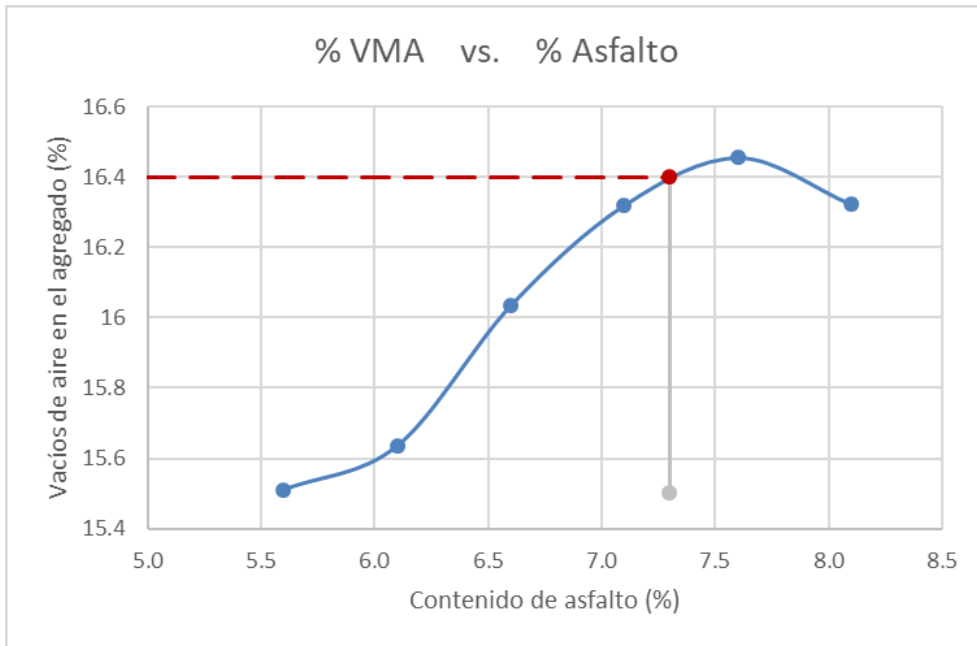


Ilustración 7.4 Gráfica %VMA vs. %Asfalto

7.5.3. Vacíos llenos de Asfalto vs. Porcentaje de asfalto

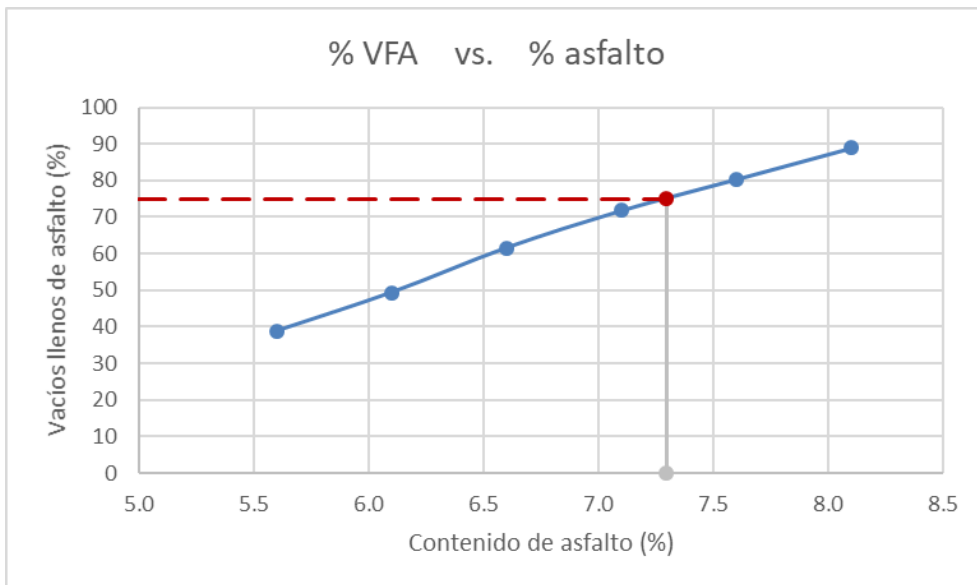


Ilustración 7.5 Gráfica %VFA vs. %Asfalto

#### 7.5.4. Densidad de la mezcla vs. Porcentaje de Asfalto

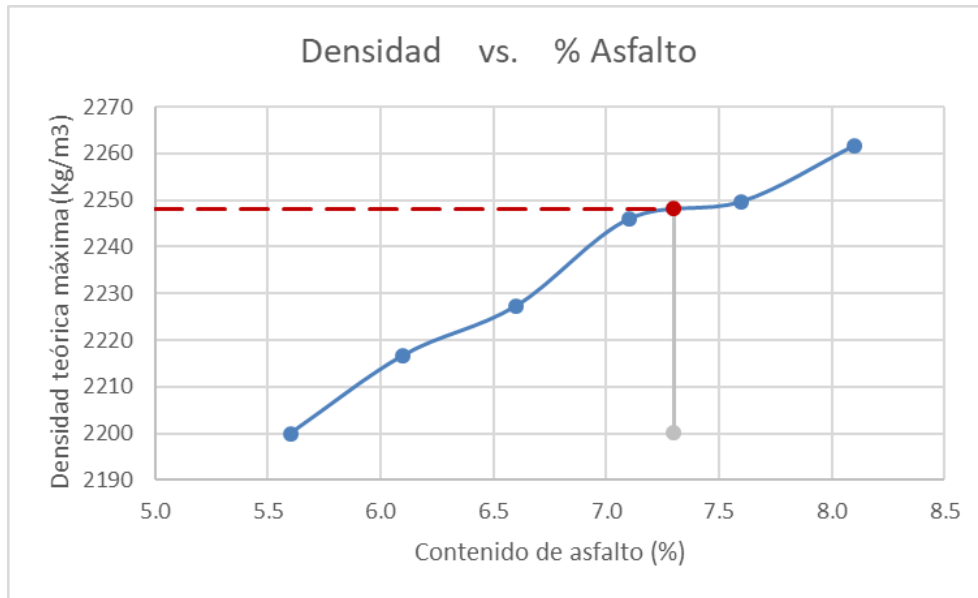


Ilustración 7.6 Gráfica Densidad vs. %Asfalto

Como se muestran en las gráficas anteriores, el porcentaje de asfalto óptimo corresponde al 7.3% de la mezcla, alcanzando 4.0% de vacíos de aire y 16.4% de vacíos en el agregado mineral de los cuales el 75% de vacíos se encontrarán llenos de asfalto, y la mezcla asfáltica obtendrá una densidad de 2248kg/m<sup>3</sup>. Todos estos valores se encuentran dentro de los límites que la norma permite y aunque las gráficas revelan los valores que se obtendrán haciendo una aproximación, es imprescindible realizar el ensayo con el nuevo porcentaje de asfalto óptimo para asegurar los resultados. El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

Mezcla original			
Propiedad volumétrica	Muestra	Requisito	
	1	Mín	Máx
Contenido de asfalto inicial Pbi			
Pbi	7.3	---	
Gmm	2.35	---	
Gmb	2.25	---	
% Va	4.0	4.0	
% VMA	16.4	---	
Ajuste para alcanzar el aglutinante de diseño (Va = 4.0% al N diseño)			
$\Delta$ Va	0.0	---	
$\Delta$ Pb	0.00	---	
$\Delta$ VMA	0.00	---	
Valores ajustados al Contenido Estimado de Diseño			
Pb. Est. Diseño	7.3	---	
VMA diseño	16.4	13	---
VFA diseño	75.0	65	75
DP	0.5	0.6	1.2
% Gmm inicial	86.6	---	89
% Gmm diseño	96.0	96	
% Gmm final	97.6	---	98

Tabla 7.7 Resumen resultados Muestra Original con 7.3% Asfalto de Diseño

## 7.6. Mezcla asfáltica modificada con vidrio molido

Uno de los objetivos de la presente disertación es encontrar el porcentaje óptimo de vidrio molido en remplazo de la arena, es por eso que se realizaron ensayos en 5 etapas con remplazo de vidrio para observar y medir el comportamiento de la mezcla asfáltica sin variar el porcentaje de asfalto óptimo, para ello se siguió con la misma metodología (Superpave) y adicionalmente se realizó el ensayo de rigidez para poder predecir el comportamiento de la mezcla. El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

Resultados de ensayos con reemplazo de vidrio pulverizado							
Propiedad volumétrica	Muestra					Requisito	
	1	2	3	4	5	Mín	Máx
Contenido de asfalto Pbd = 7.3%							
% Vidrio molido	5%	15%	25%	35%	40%	---	
Gmm	2.35	2.35	2.38	2.35	2.36	---	
Gmb	2.27	2.30	2.24	2.27	2.27	---	
%Va	3.27	2.53	5.71	3.79	3.66	4.0	
%VMA	15.65	14.80	16.86	15.92	15.75	---	
Ajuste para alcanzar el aglutinante de diseño (Va = 4.0% al N diseño)							
$\Delta Va$	0.73	1.47	-1.71	0.21	0.34	---	
$\Delta Pb$	-0.29	-0.59	0.68	-0.09	-0.13	---	
$\Delta VMA$	-0.07	-0.15	-0.34	-0.02	-0.03	---	
Valores ajustados al Contenido Estimado de Diseño							
Pb. Est. Diseño	7.0	6.7	8.0	7.2	7.2	---	
VMA diseño	15.6	14.7	16.5	15.9	15.7	13	---
VFA diseño	79.0	82.7	65.4	76.2	76.7	65	75
DP	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.6	1.2
% Gmm inicial	86.1	86.5	88.6	87.1	87.2	---	
% Gmm diseño	96.0	96.0	96.0	96.0	96.0	96	
% Gmm final	97.6	97.4	97.4	97.4	97.4	---	

Tabla 7.8 Resumen resultados Porcentaje de Vidrio Molido en Mezcla Asfáltica

## Representaciones gráficas de los valores obtenidos anteriormente

### 7.6.1. Contenido de Vacíos Vs. Porcentaje de vidrio Molido

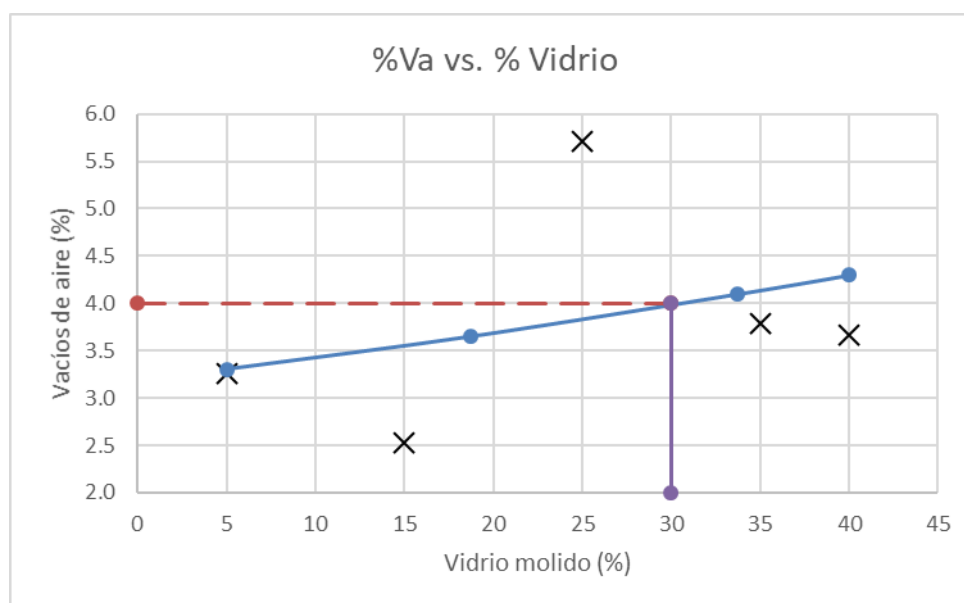


Ilustración 7.7 Gráfica %Va vs. %Vidrio

### 7.6.2. Vacíos en el Agregado Mineral vs. Porcentaje de Vidrio Molido

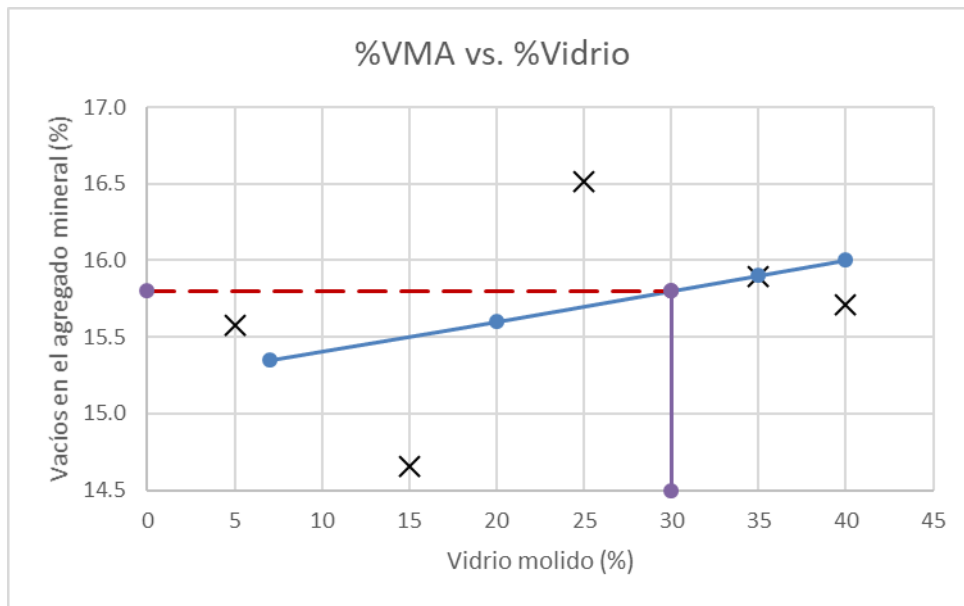


Ilustración 7.8 Gráfica %VMA vs. %Vidrio

### 7.6.3. Vacíos llenos de Asfalto vs. Porcentaje de Vidrio Molido

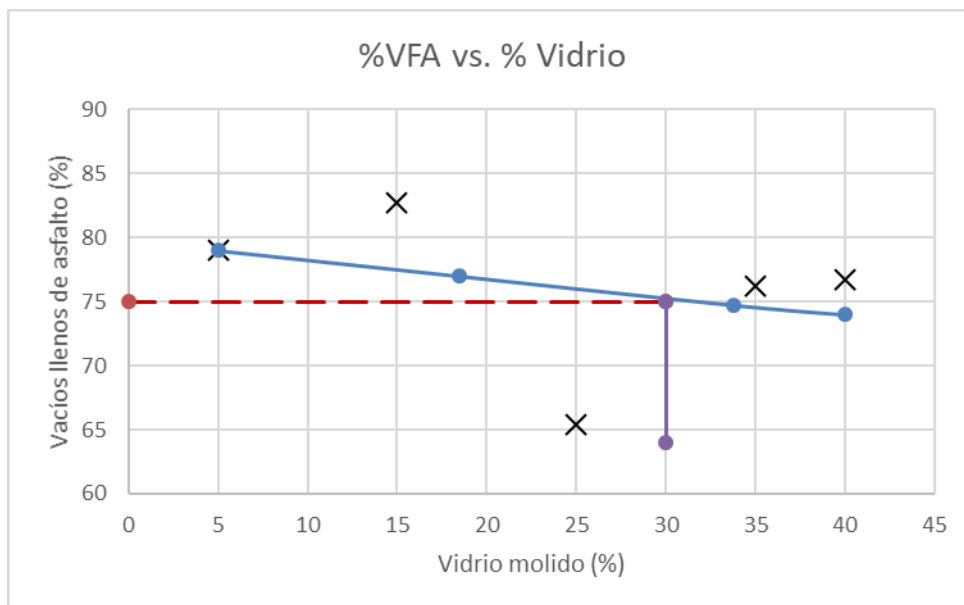


Ilustración 7.9 Gráfica %VFA vs. %Vidrio

7.6.4. Densidad de la mezcla vs. Porcentaje de Vidrio Molido

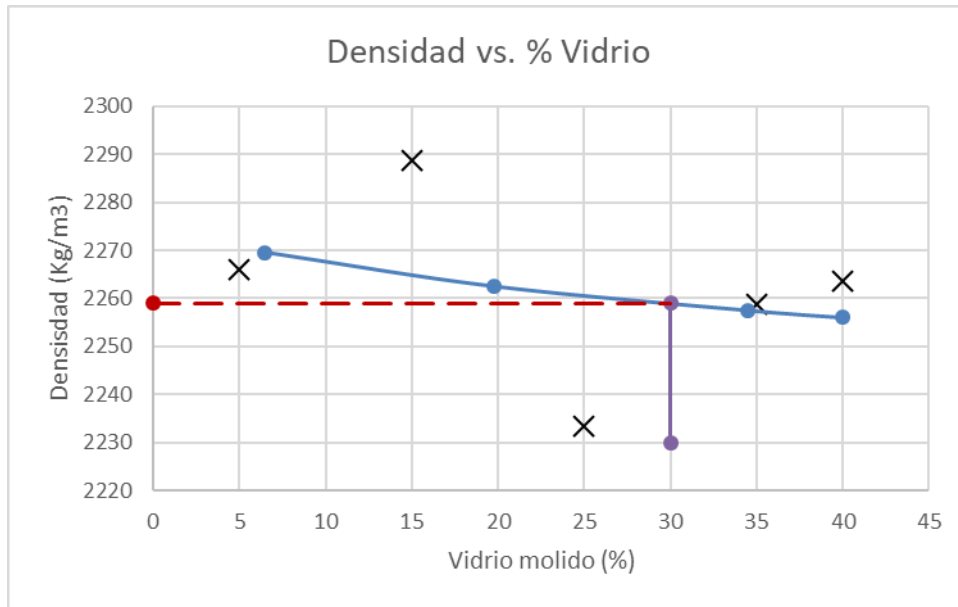


Ilustración 7.10 Gráfica Densidad vs. %Vidrio

Como se puede observar en las gráficas anteriores con el contenido de asfalto del 7.3% y las variaciones de vidrio molido la mezcla produce una dispersión de datos con la cual es difícil tomar un valor único, es por esto, que se realizó una relación de dependencia entre los Va, VMA y VFA y los porcentajes de vidrio, modelando su tendencia mediante una línea recta; teniendo como resultado al 4.0% de vacíos de aire un porcentaje de vidrio óptimo equivalente al 30% con 15.8% de vacíos en su agregado mineral y 75% de vacíos llenos de asfalto. Un último ensayo para confirmar estos valores se muestra en la tabla a continuación:

Mezcla con % Vidrio Óptimo			
Propiedad volumétrica	Muestra	Requisito	
	1	Mín	Máx
Contenido de asfalto Pbd = 7.3%			
% Vidrio molido	30%	---	
Gmm	2.36	---	
Gmb	2.27	---	
Densidad	2259	---	
% Va	4.0	4.0	
% VMA	15.9	---	
Ajuste para alcanzar el aglutinante de diseño (Va = 4.0% al N diseño)			
Δ Va	0.0	---	
Δ Pb	0.0	---	
Δ VMA	0.0	---	
Valores ajustados al Contenido Estimado de Diseño			
Pb. Est. Diseño	7.3	---	
VMA diseño	15.9	13	---
VFA diseño	75	65	75
DP	0.5	0.6	1.2
% Gmm inicial	86.9	---	89
% Gmm diseño	96.0	96	
% Gmm final	97.5	---	98

Tabla 7.9 Resumen resultados Mezcla Asfáltica con 30% de Vidrio Molido

### 7.7. Módulo de rigidez en la mezcla asfáltica modificada con vidrio molido

El módulo de rigidez se utiliza en el diseño estructural del pavimento, por lo que es importante determinar si este valor varía con respecto al vidrio molido introducido para poder observar su comportamiento. El resumen de resultados se muestra en la siguiente tabla:

Resultados de ensayo del Módulo de Rigidez						
Tipo de Briqueta	Módulo de rigidez		Pomedio	Requisito		Tolerancia (+10% -20%)
	1	2		Mín	Máx	
Contenido de asfalto Pb = 7.3%						
Original	1054	-	1054	1500	3000	-
Vidrio 5%	1589	1521	1555			4%
Vidrio 15%	1649	1636	1642.5			1%
Vidrio 25%	2010	2051	2030.5			-2%
Vidrio 35%	2132	2180	2156			-2%
Vidrio 40%	2547	2563	2555			-1%

Ilustración 7.10 Resumen de resultados del Módulo de Rigidez

Los valores se representan de manera gráfica para observar su desarrollo conforme se aumenta la cantidad de vidrio:

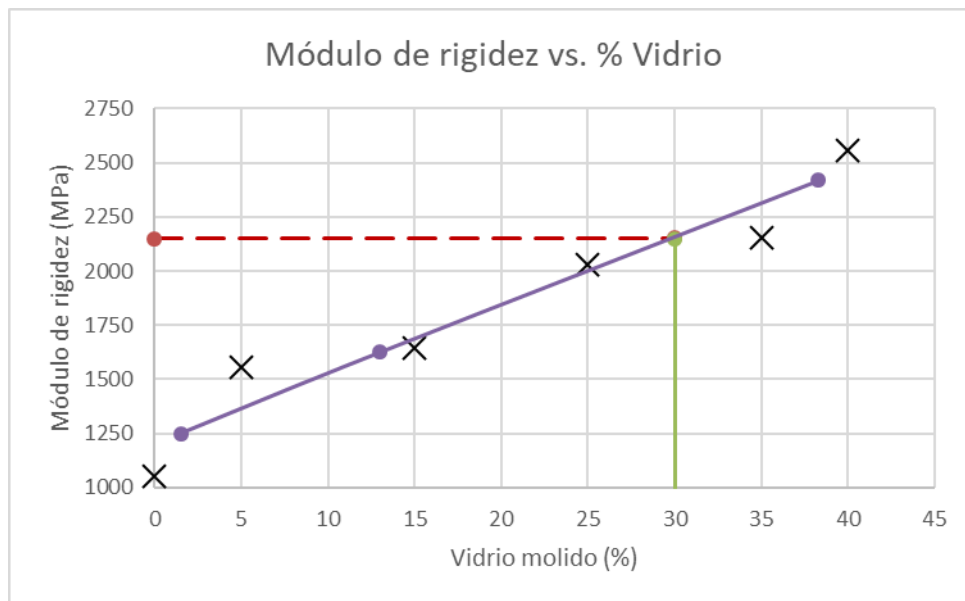


Ilustración 7.11 Gráfica Módulo de Rigidez vs. %Vidrio

Utilizando el porcentaje de vidrio óptimo para esta mezcla, se puede observar que el módulo promedio de rigidez alcanzado es de 2150Mpa, el cual se encuentra dentro del rango recomendado en la norma.

## **CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Una vez obtenido los resultados gráficos, mostrados en el capítulo anterior, del diseño de mezclas asfálticas en estado original y con modificación en el porcentaje de vidrio molido, fue posible establecer las siguientes conclusiones.

Es necesario mencionar que esta nueva metodología enfatiza la estricta selección del agregado mineral, del aglutinante asfáltico y de la compactación, siendo evaluados mediante ensayos prácticos en laboratorio.

### **Conclusión General**

- El diseño de mezcla asfáltica en caliente utilizando agregado mineral de la cantera de Guayllabamba, 30% de vidrio molido en reemplazo por el material fino (como porcentaje de vidrio óptimo para la mezcla) y cantidad de asfalto de diseño del 7.3% cumplió con los parámetros establecidos en las normas ASTM, AASHTO e INEN. Con estas cantidades de materiales el ensayo de tracción indirecta (módulo de rigidez) alcanza una rigidez de 2150MPa, los cuales se encuentran dentro del rango de la norma 1000 – 3000 MPa; satisfaciendo así, los requerimientos del diseño Superpave.

### **Conclusiones Específicas**

#### **Del Agregado mineral**

- Las propiedades de origen y de consenso, las cuales son ensayos que controlan la calidad del agregado fino y grueso, cumplen (en su totalidad) con la sección 811 de la especificación técnica ecuatoriana MOP-001-F-2002 y con las normas internacionales AASHTO.

- Entre los ensayos que se encuentran fuera del rango son: 1) el de partículas planas y alargadas obteniendo un valor del 11% mientras que su rango máximo permisible es del 10%; 2) equivalente de arena, el cual no llega a la exigencia mínima de 45%, influyendo finalmente en las proporciones de polvo (DP) que alcanza un valor de 0.5 en todos sus diseños y 3) el ensayo de materiales deletéreos, como se puede observar en la tabla resumen 7.1 sus valores se encuentran lejos de su rango máximo del 1%, sin embargo, al encontrarse próximo a sus rangos no repercute de manera excesiva en el diseño de la mezcla asfáltica.

### **Del Aglutinante Asfáltico**

- Con respecto al aglutinante asfáltico: dentro de la clasificación por viscosidad, aunque dos de sus parámetros se encuentren incumpliendo los requisitos, todos los demás apuntan a que pertenece al grupo AC-20, establecido en la norma INEN 2515; por otro lado, mediante la clasificación por desempeño, todos los ensayos realizados cumplen con lo establecido de acuerdo a la norma AASHTO M 320 y definen al asfalto con un grado PG 64-22, esto se debe a que el asfalto utilizado fue completamente virgen, extraído de la refinería de Esmeraldas y ensayado dentro de los tiempos permisibles para que no sufra envejecimiento; concluyendo que en ambos casos si se los tomará bajo sus respectivas denominaciones.

## De los Parámetros Volumétricos

- El contenido inicial estimado de asfalto es calculado mediante relaciones entre la gravedad específica Bulk y Aparente del agregado mineral y la gravedad específica del asfalto, sin embargo, este valor depende de los vacíos de la mezcla asfáltica. Por lo establecido en la norma AASHTO, un porcentaje aceptable de vacíos es del 4.0% concluyendo, para nuestro caso, que el porcentaje óptimo de asfalto que cumpla con lo requerido en vacíos es del 7.3% del peso total del agregado mineral. Véase gráfica 7.3
- Los vacíos en el agregado mineral (VMA) depende de la gravedad específica de la mezcla de agregados (grueso, medio y fino) y la gravedad específica Bulk de la mezcla asfáltica, es por esto que aun cuando la cantidad de asfalto varía en grandes porcentajes (5.6% - 8.1%) estos valores no tienen mayor diferencia, como se puede evidenciar en la tabla 7.7. Estos resultados demuestran que el agregado cumple con el requerimiento mínimo del 13% en la mezcla asfáltica, pero también que tiene una gran capacidad de absorción lo cual demanda una mayor cantidad de asfalto para cubrir sus huecos.
- Valores altos de VAM significa que existe más espacio intergranular en la mezcla elaborada y mayor disponibilidad para el asfalto y aire, como lo mencionado anteriormente; por esta misma razón, el valor de VFA presente en la mezcla compactada alcanza su rango máximo del 75% ya que, al existir mayor espacio para alojar el asfalto efectivo, las briquetas presentan un mayor porcentaje de saturación conforme aumenta la cantidad de asfalto.

- Como se puede observar en la tabla 7.8, los porcentajes de vidrio molido no afecta mayormente en la variación de los parámetros volumétricos de la mezcla, teniendo rangos con menos del 1% en vacíos de aire, vacíos de agregado mineral, proporciones de polvo, con respecto al diseño original sin vidrio molido; sin embargo, la cantidad de asfalto si varía al igual que los vacíos llenos de asfalto de la mezcla. Por estas pequeñas variaciones y para encontrar el porcentaje de vidrio molido óptimo de la mezcla es que se realizó un ensayo final estableciendo 30% vidrio molido en reemplazo de los finos, 7.3% de asfalto para la mezcla y cumplió casi todos los rangos aceptables en Superpave como se muestra en la tabla 2.7, concluyendo que este diseño si puede ser considerado para ser utilizado en la creación de la carpeta asfáltica.
- Con respecto a los parámetros volumétricos: tanto en diseño original y modificado con vidrio molido, la mayor parte sus criterios cumplen con la metodología Superpave y solamente las proporciones de polvo, las cuales son afectadas directamente por la pobre cantidad de finos del agregado mineral, se encuentra cerca de su rango inferior; dando como conclusión que todos los parámetros de la mezcla asfáltica caliente son aceptables y pueden ser utilizados para el diseño del pavimento flexible.

### **Del Módulo de Rigidez**

- Como se puede observar en la tabla 7.10, el módulo de rigidez para el diseño de mezcla original no cumple con los requisitos mínimos de la norma 1500Mpa, relacionando directamente el problema en la pobre granulometría de los finos y

posibles aumentos de materiales perjudiciales en el agregado tipo medio, ocasionando posibles fallos en el pavimento como agrietamientos o hendiduras.

- Para los diseños modificados con vidrio molido podemos observar como los módulos aumentan y cumplen con la norma desde el primer porcentaje de vidrio del 5% con un módulo de 1555MPa, hasta el porcentaje del 40% con un módulo de 2555Mpa; ya que el reemplazo se lo hace solo en el material fino se puede concluir que este ayuda en la unión de los espacios intersticiales del agregado mineral y el asfalto, haciendo una mezcla más conglomerada y resistente.
- La capacidad para soportar una carga aplicada verticalmente a la superficie del vidrio se encuentra entre los 800 y 1000MPa (Saint-Gobain Sekurit, 2019), mientras que la de un material rocoso competente va de los 80 a 160MPa (Comisión Federal de Electricidad, 2008). Comparando la muestra original y la modificada con porcentaje de vidrio óptimo del 30% podemos observar que en cuestión a módulos de rigidez esta la supera por el doble con un valor de 2150MPa; concluyendo que el vidrio molido ayuda a la rigidez de la mezcla asfáltica y puede evitar fallos durante su vida útil, sin embargo, al ser un diseño de pavimento flexible, se desea tener una elasticidad en la mezcla, es por eso que su reemplazo se limita hasta el 40% del peso total.
- Finalmente, con respecto al módulo de rigidez se concluye que el vidrio ayuda para aumentar su rigidez, proporcionando propiedades mecánicas mejores y ayuda a prevenir los fallos de agrietamiento y/o rotura en el diseño del pavimento. Se aceptan los valores de todos sus ensayos para el diseño utilizando como óptimo el 30% de reemplazo en los finos.

## Recomendaciones

- El diseño Superpave se caracteriza por ser un sistema de diseño que agrupa el agregado mineral, el aglutinante asfáltico y los parámetros volumétricos de diseño, es por eso que tiene un grado de exigencia el cual nos obliga a seleccionar los materiales sin tener faltas algunas, por lo tanto, se recomienda realizar pruebas del material pétreo y cumplir con los requerimientos antes de proponer la realización de un diseño mediante Superpave.
- Como se puede observar en la tabla 7.4 el aglutinante asfáltico cumple con todos los requisitos para cumplir su grado de desempeño, sin embargo, se recomienda tener datos actualizados (trimestrales o semestrales) de los parámetros del aglutinante.
- Se recomienda consultar con los laboratorios si se tiene disponibilidad de equipos para realizar los ensayos que competen el diseño Superpave y los costos que generan estos, ya que, al ser una metodología no utilizada en el Ecuador, existen pocos laboratorios que pueden adaptarse a cumplir con los parámetros.
- Para el moldeo de especímenes Superpave la norma recomienda una masa de agregado mineral de 4700gr, sin embargo, el tipo de agregado y la cantidad de asfalto utilizado influye para alcanzar la altura mínima 130mm, en esta disertación la masa utilizada fue de  $5000 \pm 100$ gr, por esto se recomienda realizar dos moldes de prueba y observar el resultado.

- Es recomendable encontrar todos los parámetros y cálculos de resultados en cada molde que se realice, así se podrá tener una guía al cual irán dirigida la investigación, no realizarla de una manera total, ya que en el camino pueden ir cambiando criterios de diseño como el contenido de aglutinante y la cantidad de vidrio, cuando se hace un diseño con material de reemplazo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ✚ American Association of State Highway and Transportations Officials. (2008). *Standard Specification for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*. Washington, D.C: AASTHO.
- ✚ ASMT D36. (2014). *Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ Asphalt Institute. (2001). *Superpave Mix Design*. Lexington: The Asphalt Institute.
- ✚ ASTM C1252. (2017). *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM C131. (2014). *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM C136. (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM C142. (2010). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM C88. (2013). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D113. (2017). *Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D2041. (2011). *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D2170. (2018). *Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Asphalts*. West Conshohocken: ASTM International.

- ✚ ASTM D2171. (2018). *Standard Test Method for Viscosity of Asphalts by Vacuum Capillary Viscometer*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D2419. (2002). *Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D2872. (2013). *Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*. West Conshohocken: ASATM International.
- ✚ ASTM D4402. (2015). *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D4791. (2010). *Standard Test Method For Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D5. (2013). *Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D5821. (2017). *Standard Test Method for Determining the Percentage of Fractured Particles in Coarse Aggregate*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D6648. (2016). *Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D70. (2018). *Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method)*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D7175. (2015). *Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer*. West Conshohocken: ASTM International.
- ✚ ASTM D92. (2018). *Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester*. West Conshohocken: ASTM International.

- ✚ Cominsky, R., Leahy, R., & Harrigan, E. (1994). *Level One Mix Design: Materials Selection, Compaction and Conditioning*. Washington, DC: National Academy of Sciences.
- ✚ Comisión Federal de Electricidad. (2008). *Manual de diseño de obras civiles, Diseño por Sismo*. México D.F.: Comisión Federal de Electricidad.
- ✚ Coree, B. J., & VanDerHorst, K. (1998). *SUPERPAVE Compaction*. Ames, Iowa: In Transportation Conference Proceedings. Center for Transportation Research and Education.
- ✚ Instituto Mexicano Del Transporte. (2005). *Análisis comparativo de los métodos Marshall y Superpave para compactación de mezclas asfálticas*. Sanfandila: IMT.
- ✚ Lavin, P. (2003). *Asphalt Pavements, A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects*. New York: Taylor & Francis.
- ✚ National Cooperative Highway Research Program. (2005). *Aggregate Properties and the Performance of Superpave-Designed Hot Mix Asphalt*. Washington, DC: Transportation Research Board.
- ✚ Roberts, F., Mohammad, L., & Wang, L. (2002). *History of Hot Mix Asphalt Mixture Design*. Reston: American Society of Civil Engineers.
- ✚ Saint-Gobain Sekurit. (10 de Octubre de 2019). *Saint-Gobain Sekurit*. Obtenido de <https://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glosario/propiedades-del-vidrio>
- ✚ Strategic Highway Research Program. (1994). *Superior Performing Asphalt Pavement (SUPERPAVE): The product of the SHRP, Asphalt Research Program*. Washington D.C.: National Academy of Sciences. Obtenido de <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-410.pdf>
- ✚ The Asphalt Institute. (1972). *MANUAL DEL ASFALTO*. Bilbao: Ediciones Urmo, S.A.
- ✚ Transportation Research Board. (1984). *America's Highways, Accelerating the Search for Innovation*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.

- ✚ UNE EN 12697-26. (2004). *Annex C: Test Applying Indirect Tension to Cylindrical specimens (IT-CY)*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

# ANEXOS































II. Evaluación de la mezcla sin modificación de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

Fecha de ensayo:			
Tipo de muestra:	Original		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2337.2	2191	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8760.4	8664.4	
			Promedio
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.36	2.33	2.35

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

Fecha de ensayo:						
Tipo de muestra:	Original					
Número de ensayos:	6					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5267.15	5262.84	5180.4	5127.94	4965.29	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2942.5	2946.68	2878.55	2861.53	2775.35	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5279.1	5275.6	5191.45	5138.16	4976.1	
						Promedio
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.25	2.26	2.24	2.25	2.26	2.25
% de agua absorbida (por volúmen):	0.51	0.55	0.48	0.45	0.49	0.50
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2247.66	2253.22	2233.29	2245.89	2249.64	2245.9

III. Evaluación de la mezcla con 5% de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

FECHA: Julio - 2019

REALIZADO POR: Alejandro Toapanta

Fecha de ensayo:	24/06/2019		
Tipo de muestra:	Modificado		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2002.4	2005.5	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8562.2	8565.7	
			Promedio
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.35	2.35	2.35

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

FECHA: Julio - 2019

REALIZADO POR: Alejandro Toapanta

Fecha de ensayo:	25/06/2019					
Tipo de muestra:	Modificado					
Número de ensayos:	6					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5149.88	5016.5	5114	5232.3	5166.6	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2889.82	2813.31	2875.18	2931.1	2905.3	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5156.7	5024.7	5120.8	5240.3	5172.5	
						Promedio
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.27	2.27	2.28	2.27	2.28	2.27
% de agua absorbida (por volúmen):	0.30	0.37	0.30	0.35	0.26	0.32
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2265.20	2261.90	2270.72	2259.28	2272.24	2266.0

IV. Evaluación de la mezcla con 15% de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

Fecha de ensayo:	25/06/2019		
Tipo de muestra:	Modificado		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2102.7	2037.3	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8622.6	8585.4	
Promedio			
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.35	2.36	2.35

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

Fecha de ensayo:	26/06/2019					
Tipo de muestra:	Modificado					
Número de ensayos:	6					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5227.66	5195.6	5240.97	5244.06	5238.06	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2977.58	2954.08	2957.08	2952.51	2956.72	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5230.1	5200.9	5247.2	5248.5	5243.7	
Promedio						
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.32	2.31	2.29	2.28	2.29	2.30
% de agua absorbida (por volúmen):	0.11	0.24	0.27	0.19	0.25	0.21
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2314.07	2305.72	2281.88	2277.38	2283.74	2288.7

V. Evaluación de la mezcla con 25% de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

Fecha de ensayo:			
Tipo de muestra:	Modificado		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2008.8	1985.3	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8575.2	8563.6	
Promedio			
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.37	2.38	2.38

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

Fecha de ensayo:	26/06/2019					
Tipo de muestra:	Modificado					
Número de ensayos:	6					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5261.39	5260	5271.56	5287.84	5264.56	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2939.23	2916.64	2926.55	2927.15	2923.39	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5270.8	5270.4	5284.4	5300.1	5276.1	
Promedio						
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.26	2.23	2.24	2.23	2.24	2.24
% de agua absorbida (por volúmen):	0.40	0.44	0.54	0.52	0.49	0.47
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2250.04	2228.24	2229.26	2221.92	2231.17	2233.5

VI. Evaluación de la mezcla con 35% de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

Fecha de ensayo:			
Tipo de muestra:	Modificado		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2074	2079.5	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8609.8	8605.6	
Promedio			
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.36	2.34	2.35

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

Fecha de ensayo:						
Tipo de muestra:	Modificado					
Número de ensayos:	3					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	4978.5	5250.33	5208	5203.56	5242.5	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2795.08	2948.06	2897.93	2923.23	2943.66	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	4983.9	5257.7	5217.4	5213.8	5249.7	
Promedio						
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.27	2.27	2.25	2.27	2.27	2.27
% de agua absorbida (por volúmen):	0.25	0.32	0.41	0.45	0.31	0.37
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2267.92	2266.63	2238.83	2265.14	2266.78	2258.8

VII. Evaluación de la mezcla con 40% de vidrio molido.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

Fecha de ensayo:			
Tipo de muestra:	Modificado		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2111	2111.6	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8628.9	8627.7	
Promedio			
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.36	2.35	2.36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis FECHA: Julio - 2019  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico REALIZADO POR: Alejandro Toapanta  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

Fecha de ensayo:						
Tipo de muestra:	Modificado					
Número de ensayos:	3					
Tipo de método:	A (Suspensión)					
% asfalto:	7.3					
Muestra #:	1	2	3	4	5	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5227.28	5233.96	5209.35	5220.87	5249.46	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2931.18	2944.1	2921.76	2920.19	2943.16	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5234.9	5241.6	5215.5	5229.2	5256.3	
Promedio						
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.27	2.28	2.27	2.26	2.27	2.27
% de agua absorbida (por volúmen):	0.33	0.33	0.27	0.36	0.30	0.33
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2262.48	2271.50	2264.53	2254.53	2262.83	2263.5

VIII. Evaluación de la mezcla con el 30% de vidrio molido

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica máximo teórica  
NORMA: ASTM D 2041

FECHA: Julio - 2019

REALIZADO POR: Alejandro Toapanta

Fecha de ensayo:			
Tipo de muestra:	Original		
Número de ensayos:	2		
Tipo de procedimiento:	Sumergido		
% de asfalto:	7.3		
Muestra #:	1	2	
Masa muestra seca en aire (gr):	2337.2	2191	
Masa contenedor lleno de agua (gr):	7413	7413	
Masa contenedor con la muestra + agua (gr):	8760.4	8675.4	
Promedio			
Gravedad específica máxima (Gmm):	2.36	2.36	2.36

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA CIVIL

PROYECTO: Tesis  
MATERIAL: Aglutinante asfáltico  
LOCALIZACIÓN: Refinería de Esmeraldas  
SUPERVISIÓN: Jhovanny Muñoz  
ENSAYO: Gravedad específica Bulk  
NORMA: AASHTO T 166

FECHA: Julio - 2019

REALIZADO POR: Alejandro Toapanta

Fecha de ensayo:				
Tipo de muestra:	Original			
Número de ensayos:	6			
Tipo de método:	A (Suspensión)			
% asfalto:	7.3			
Muestra #:	1	2	3	
A: Masa muestra seca en aire (gr):	5268.52	5262.84	5269.47	
C: Masa sumergida en agua a 25±1°C (gr):	2948.42	2946.68	2948.54	
B: Masa saturada con superficie seca SSD (gr):	5276.55	5269.74	5270.51	
Promedio				
Gravedad específica Bulk (Gmb):	2.26	2.27	2.27	2.27
% de agua absorbida (por volúmen):	0.34	0.30	0.04	0.23
Densidad máxima teórica (Kg/m3):	2256.42	2258.91	2262.81	2259.4