

**ESTADO DEL ARTE EN FORMULACION DE  
MEZCLAS ASFALTICAS**

**LIDA PIEDAD ALVAREZ ACEVEDO  
DIEGO FERNANDO ARCILA CARRASCO**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECAÑICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2009**

# **ESTADO DEL ARTE EN FORMULACION DE MEZCLAS ASFALTICAS**

**LIDA PIEDAD ALVAREZ ACEVEDO  
DIEGO FERNANDO ARCILA CARRASCO**

**Director  
ING. EDUARDO ALBERTO CASTAÑEDA PINZÓN**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2009**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **Los autores expresan su agradecimiento:**

A Eduardo A. Castañeda P., Ingeniero Civil y Director de la Investigación, profesor titular de la escuela de Ingeniería Civil, UIS, por su confianza y colaboración.

A todos los docentes adscritos a la escuela de Ingeniería Civil quienes aportaron su conocimiento para nuestro futuro desempeño como profesionales.

A la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad y las herramientas para formarnos profesionalmente.

## CONTENIDO

|   | pág.      |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>16</b> |
| <b>OBJETIVOS</b>  | <b>18</b> |
| <b>OBJETIVO GENERAL</b>   | <b>18</b> |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>  | <b>18</b> |
| <b>CAPITULO I. GENERALIDADES</b>  | <b>19</b> |
| <b>1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS</b>   | <b>19</b> |
| <b>1.1.1 Propiedades de las Mezclas Asfálticas.</b>                       | <b>19</b> |
| <b>1.2 MÉTODOS DE FORMULACIÓN</b>   | <b>22</b> |
| <b>1.2.1 Marshall.</b>  | <b>23</b> |
| <b>1.2.2 Superpave.</b>   | <b>24</b> |
| <b>1.2.3 LPC.</b>   | <b>24</b> |
| <b>1.2.4 Hveem.</b>   | <b>25</b> |
| <b>CAPITULO II. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES</b>                        | <b>27</b> |
| <b>2.1. ARIDOS</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.2. LIGANTES</b>  | <b>30</b> |
| <b>CAPITULO III. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS</b> | <b>32</b> |
| <b>3.1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA</b>                                       | <b>32</b> |
| <b>3.2. RIGIDEZ</b>   | <b>37</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>3.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL</b>        | <b>38</b>  |
| <b>CAPITULO IV. METODOS DE FORMULACIÓN</b> | <b>43</b>  |
| <b>4.1. MARSHALL</b>                       | <b>44</b>  |
| 4.1.1. Selección de los Componentes.       | 46         |
| 4.1.2. Fabricación de Probetas.            | 49         |
| 4.1.3. Selección del Contenido de Ligante. | 54         |
| <b>4.2. SUPERPAVE</b>                      | <b>59</b>  |
| 4.2.1. Selección de los Componentes.       | 64         |
| 4.2.2. Fabricación de Probetas.            | 70         |
| 4.2.3. Selección del Contenido de Ligante. | 78         |
| <b>4.3 LPC</b>                             | <b>88</b>  |
| 4.3.1. Selección de los Componentes.       | 88         |
| 4.3.2. Contenido Mínimo de Ligante.        | 94         |
| 4.3.3. Fabricación de la Mezcla            | 95         |
| 4.3.4. Caracterización de las Mezclas.     | 96         |
| 4.3.5. Selección de la Formula de Trabajo. | 102        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                        | <b>105</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>                        | <b>107</b> |

## LISTA DE TABLAS

|  | pág.      |
|--|-----------|
| <b>Tabla 1. Uso de los métodos según el país</b>                   | <b>43</b> |
| <b>Tabla 2. Granulometría Marshall</b>                             | <b>47</b> |
| <b>Tabla 3. Niveles de análisis y diseño de mezclas asfálticas</b> | <b>63</b> |
| <b>Tabla 4. Masa del agregado</b>                                  | <b>69</b> |
| <b>Tabla 5. Temperaturas según el grado de comportamiento (PG)</b> | <b>71</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|   | pág.      |
|---|-----------|
| <b>Figura 1. Propiedades mezclas asfálticas</b>                             | <b>20</b> |
| <b>Figura 2. Estabilímetro de Hveem</b>                                     | <b>26</b> |
| <b>Figura 3. Material granular</b>  | <b>27</b> |
| <b>Figura 4. Forma de los agregados</b>                                     | <b>29</b> |
| <b>Figura 5. Ligante asfáltico</b>  | <b>30</b> |
| <b>Figura 6. Componentes volumétricos de mezclas asfálticas compactadas</b> | <b>34</b> |
| <b>Figura 7. Parámetros de diseño volumétrico</b>                           | <b>36</b> |
| <b>Figura 8. Vacíos en la mezcla asfáltica</b>                              | <b>37</b> |
| <b>Figura 9. Deformaciones permanentes</b>                                  | <b>40</b> |
| <b>Figura 10. Agrietamientos y fisuras por fatiga</b>                       | <b>41</b> |
| <b>Figura 11. Elaboración de la mezcla</b>                                  | <b>52</b> |
| <b>Figura 12. Martillo de compactación</b>                                  | <b>53</b> |
| <b>Figura 13. Equipo Marshall</b>   | <b>55</b> |
| <b>Figura 14. Diagrama de flujo Superpave</b>                               | <b>61</b> |
| <b>Figura 15. Viscosímetro Rotacional</b>                                   | <b>70</b> |
| <b>Figura 16. Principio fundamental de compactación</b>                     | <b>74</b> |
| <b>Figura 17. Compactador giratorio Superpave</b>                           | <b>76</b> |
| <b>Figura 18. Funcionamiento compactador giratorio</b>                      | <b>78</b> |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Figura 19. Deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico</b> | <b>79</b>  |
| <b>Figura 20. Ensayos Superpave</b>  | <b>80</b>  |
| <b>Figura 21. Esquema ensayo de viscosímetro rotacional</b>                                | <b>82</b>  |
| <b>Figura 22. Esquema ensayo reómetro de corte dinámico</b>                                | <b>83</b>  |
| <b>Figura 23. Esquema ensayo reómetro de viga a flexión</b>                                | <b>85</b>  |
| <b>Figura 24. Esquema ensayo de tracción directa</b>                                       | <b>86</b>  |
| <b>Figura 25. Compactador giratorio</b>  | <b>97</b>  |
| <b>Figura 26. Probeta de ensayo de compresión simple</b>                                   | <b>99</b>  |
| <b>Figura 27. Equipo para medir resistencia al ahuellamiento</b>                           | <b>100</b> |
| <b>Figura 28. (a) Ensayo de modulo complejo (b) Ensayo de tracción directa</b>             | <b>101</b> |
| <b>Figura 29. Ensayo de fatiga</b>   | <b>102</b> |
| <b>Figura 30. Secuencia ensayos LPC</b>  | <b>103</b> |

## LISTA DE GRÁFICOS

|  | pág.      |
|--|-----------|
| <b>Gráfica 1. Temperatura vs Viscosidad</b>                    | <b>51</b> |
| <b>Gráfica 2. Contenido de asfalto vs Vacios</b>               | <b>57</b> |
| <b>Gráfica 3. Contenido de asfalto vs VMA</b>                  | <b>57</b> |
| <b>Gráfica 4. Contenido de asfalto vs VFA</b>                  | <b>58</b> |
| <b>Gráfica 5. Contenido de asfalto vs <math>G_{mb}</math></b>  | <b>58</b> |
| <b>Gráfica 6. Carta de graduación granulométrica Superpave</b> | <b>68</b> |
| <b>Gráfica 7. Número de giros vs porcentaje de vacios</b>      | <b>98</b> |

## RESUMEN

**TITULO: ESTADO DEL ARTE EN FORMULACIÓN DE MEZCLAS ASFÁLTICAS\***

**AUTORES: LIDA PIEDAD ALVAREZ ACEVEDO  
DIEGO FERNANDO ARCILA CARRASCO\*\***

**PALABRAS CLAVE: Estado del arte, formulación, mezclas asfálticas, pavimentos, Marshall, Superpave, LPC.**

### **DESCRIPCIÓN:**

Las mezclas asfálticas se pueden definir como una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos. Sus principales propiedades son resistencia estructural, durabilidad, rigidez, adherencia e impermeabilidad. Estas propiedades dependen en gran medida de las proporciones volumétricas de los componentes en la mezcla, por esto se debe hacer un diseño en laboratorio para simular el comportamiento que tendrán en campo. Es por esto que alrededor del mundo se han venido desarrollando diversas metodologías que permiten encontrar los contenidos de cada uno de los componentes de las mezclas asfálticas y limitar el tipo de materiales que se utilizan para su preparación.

Este trabajo ha sido desarrollado en cuatro capítulos, dentro de los que se encuentran un primer capítulo con generalidades sobre las mezclas asfálticas, sus propiedades y métodos de diseño, el segundo que menciona las propiedades de los componentes de las mezclas asfálticas, un tercero que habla del contenido volumétrico y se hace énfasis en las propiedades más importantes de las mezclas y un último capítulo en el que se realiza una comparación de tres métodos de diseño como, son el método Marshall, el cual es el método más utilizado en Colombia. el método Superpave, que es el desarrollo del programa SHRP del Departamento de Transporte de Estados Unidos de Norteamérica y el método LPC desarrollado por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos (LCPC) de Francia. Finalmente se encuentran las conclusiones que los autores hacen sobre el trabajo.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, escuela de Ingeniería Civil, Director Eduardo Castañeda

## **SUMMARY**

**TITLE: STATE OF THE ART ON ASPHALT MIXTURES FORMULATION\***

**AUTHORS: LIDA PIEDAD ALVAREZ ACEVEDO  
DIEGO FERNANDO ARCILA CARRASCO\*\***

**KEY WORDS: State of the art, formulation, asphalt mixtures, pavements, Marshall, Superpave, LPC.**

### **DESCRIPTION**

Asphalt mixes can be defined as a combination of asphalt and mineral aggregate stone. Their main properties are structural strength, durability, stiffness, grip and waterproofing. These properties depend heavily on the volumetric proportions of the components in the mixture, this must be done by a design lab that will simulate the behavior in the field. For this reason, around the world have developed different methodologies to find the contents of each component of asphalt mixtures and limit the type of materials used in its preparation.

This work has been developed in four chapters. At the first one there are generalities on asphalt mixtures, their properties and methods of design, the second one refers to properties of asphalt mixtures' components, a third speaks about volumetric content and emphasizes the most important properties of mixtures and a final chapter that makes a comparison between three hot mix asphalt methods, the Marshall method which is the most used in Colombia, the Superpave method which is a development of the Strategic Highway Research Program (SHRP) in the United States and LPC method developed by the Central Laboratory of Bridges and Roads (LCPC) in France. Finally, the conclusions that the authors make about the work

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, escuela de Ingeniería Civil, Director Eduardo Castañeda

## INTRODUCCIÓN

El diseño de mezclas asfálticas tiene como objetivo principal realizar una adecuada selección de los materiales para lograr un buen desempeño de los pavimentos en su vida de servicio. De ahí, la importancia de simular de manera adecuada en el laboratorio lo que ocurre en el campo, bajo acción vehicular y llegar a producir mezclas que muestren un mejor comportamiento en condiciones prevaletientes de tránsito y clima.

Los métodos de formulación resultan de un proceso largo y complejo, que necesita de numerosas aproximaciones y ensayos de laboratorio con el fin de encontrar una fórmula que garantice la seguridad de uso de las obras de infraestructura, su durabilidad y sus costos de mantenimiento, por esto es importante el conocimiento de las técnicas disponibles para que se adopten soluciones idóneas y se logre una óptima calidad de las obras.

Este documento pretende realizar una descripción general de los avances e innovaciones tecnológicas en el área de formulación de materiales para pavimentos de hormigón bituminoso, presentando el estado del arte de las técnicas desarrolladas. Algunas de estas son de práctica común en otros países desde hace años o décadas de modo que, el término "innovación", se refiere al hecho que en el país nunca se han aplicado o bien existe poca experiencia al respecto.

Dentro del contenido se encuentra una descripción general de lo que son las mezclas asfálticas, sus propiedades más importantes y los materiales que las componen, entre otros, para posteriormente entrar a definir los métodos de

formulación de mezclas asfálticas existentes en la actualidad, objetivo principal de este proyecto.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Recopilar información que permita establecer las tendencias en formulación de mezclas asfálticas, para que sirva como guía de investigaciones sobre el tema.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar e interpretar la literatura encontrada y posteriormente clasificarla de acuerdo con su importancia dentro del trabajo de investigación.
- Documentar los diferentes métodos de formulación de mezclas asfálticas.
- Establecer las técnicas de ensayos más empleadas en la selección de materiales para la fabricación de mezclas asfálticas.

## **CAPITULO I. GENERALIDADES**

### **1.1 MEZCLAS ASFÁLTICAS**

Las mezclas asfálticas se pueden definir como una combinación de asfalto y agregados minerales pétreos. Las proporciones relativas de estos minerales determinan las propiedades físicas de la mezcla y, eventualmente, el desempeño de la misma como mezcla terminada para un determinado uso. Es por esto que se han venido desarrollando diversas metodologías que permiten encontrar los contenidos de cada uno de los componentes de las mezclas asfálticas y limitar el tipo de materiales que se utilizan para su preparación. A estos métodos se les conoce como de formulación de mezclas asfálticas.

Cuando se emplean en capas superficiales, las mezclas asfálticas sirven para soportar directamente las acciones de los neumáticos y transmitir las cargas a las capas inferiores, proporcionando unas condiciones adecuadas de rodadura. En las demás capas se consideran como un material con resistencia estructural o mecánica.

El comportamiento de la mezcla depende de circunstancias externas a ellas mismas, tales como son el tiempo de aplicación de la carga y de la temperatura. Por esta causa su caracterización y propiedades tienen que estar vinculadas a estos factores.

**1.1.1 Propiedades de las Mezclas Asfálticas.** Antes de entrar a definir las propiedades de las mezclas asfálticas, se debe tener claro que no es posible proyectar una mezcla que satisfaga plenamente todas las propiedades, debido a que algunas de ellas son contrapuestas y porque la importancia de unas u otras

depende de la funcionalidad y estructura a realizar. Para conseguir que prevalezcan unas determinadas propiedades, se deberá considerar las cualidades de los materiales constituyentes, su dosificación y las condiciones de fabricación y puesta en obra de la mezcla.

**Figura 1. Propiedades mezclas asfálticas**



Fuente: [www.camineros.com/educacion/labequip1.gif](http://www.camineros.com/educacion/labequip1.gif)

Las principales propiedades de las mezclas bituminosas son las siguientes:

**a. Resistencia estructural.** La primera condición que debe cumplir una mezcla asfáltica es soportar las cargas impuestas por el tráfico.

Por un lado, la acumulación de estas cargas con el tiempo produce una deformación permanente que se manifiestan en la superficie del pavimento y que pueden causar que éste deje de cumplir sus funciones, independientemente de que las deformaciones no hayan conducido a un colapso estructural propiamente dicho.

Por otro, la repetición de cargas, produce un agotamiento progresivo por fatiga del material. La fatiga se traduce en un aumento de las deformaciones elásticas en la superficie, y cuando se llega a un avanzado estado de la misma se pueden observar agrietamientos generalizados denominados comúnmente piel de cocodrilo.

**b. Durabilidad.** Se define como la capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación.

Las mezclas asfálticas, generalmente situadas en las capas de rodadura, son susceptibles a agresiones externas como la radiación solar, la oxidación del ligante producida por el aire, el agua o el hielo, además de aceites y combustibles, todos éstos factores que afectan la conservación de sus propiedades en el tiempo.

**c. Rigidez.** Es la capacidad soportar esfuerzos sin adquirir grandes deformaciones o desplazamientos. La rigidización de la mezcla asfáltica puede ser producida por pérdida de flexibilidad debido a un exceso de polvo mineral, o al envejecimiento del asfalto.

**d. Adherencia.** Esta característica de las mezclas asfálticas tiene influencia directa en la seguridad del conductor, ya que permite reducir la distancia de frenado y mantener, en todo momento, la trayectoria deseada del vehículo. Depende directamente de las características intrínsecas de los áridos y de la composición granulométrica de la mezcla. Esta propiedad es medida con el denominado coeficiente de fricción, el cual se cuantifica físicamente relacionando factores como la fuerza de fricción y el peso del neumático.

**e. Resistencia a la fractura dada por cambios severos de temperatura.** En la actualidad uno de los problemas con mayor incidencia en el deterioro de las vías

asfaltadas, es la presencia de fisuras y los cambios severos de temperatura es una de las causas por las cuales se presentan. Cuando se produce un endurecimiento del asfalto, éste se torna frágil y propenso a fisuras bajo esfuerzos de decrecimiento de la temperatura de la capa asfáltica, dicha variación no solo crea esfuerzos de tensión debido a la contracción térmica, sino también incrementa su rigidez, aumentando las fallas ocasionadas por el tránsito.

**f. Impermeabilidad.** Las mezclas bituminosas de las capas superiores deben proteger la infraestructura frente a la acción del agua que cae sobre la calzada. No obstante, esta permeabilidad no tiene porqué estar confiada a la capa de rodadura, habiéndose desarrollado las denominadas mezclas porosas.

Las mezclas porosas consiguen una inmediata eliminación del agua superficial por infiltración, lo cual favorece la seguridad del usuario al eliminar el agua de la superficie de rodadura. La impermeabilidad se garantiza mediante la capa inferior. El componente de las mezclas asfálticas encargado de su impermeabilidad es el polvo mineral (material granular que pasa por el tamiz No. 200), pues llena los vacíos del esqueleto de agregados gruesos y finos.

## **1.2 MÉTODOS DE FORMULACIÓN**

Los métodos de formulación de mezclas asfálticas se han desarrollado en los últimos cuarenta años como respuesta a la evolución de diferentes factores como el aumento de las solicitudes debidas al tránsito de vehículos, el tener en cuenta la seguridad, la durabilidad, y el mantenimiento, entre otros.

En este momento se diferencian seis tipos de métodos de formulación:

- Por receta: este método se aplica en función a la experiencia. Se adopta una fórmula que ha dado buenos resultados en un lugar y se reproduce.
- Por ensayos empíricos: se basa en resultados de ensayos realizados que son comparados con comportamientos obtenidos en campo.
- Por cálculos analíticos: están fundamentados en las propiedades de los constituyentes y el modelamiento de la mezcla para calcular el porcentaje de vacíos y estimar el comportamiento del material
- Volumétricos: consiste en deducir de las proporciones respectivas expresadas en volumen de una probeta compactada en condiciones establecidas.
- Por ensayos ligados a las propiedades: estos hacen referencia a ensayos de simulación en relación directa con una propiedad buscada.
- Por ensayos fundamentales: comprende ensayos en los que el resultado es directamente utilizable como dato de entrada en modelos de dimensionamiento.

A continuación se presenta una breve definición de los métodos más utilizados para la conformación y diseño de mezclas asfálticas dentro de los que se encuentran Marshall, Superpave y el desarrollado por el LPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ) de Francia, así como también se menciona el método Hveem, una técnica poco utilizada, pero que es importante tener en cuenta.

**1.2.1 Marshall.** Este es uno de los métodos en diseño de mezclas más usado en la actualidad. Esta técnica fue diseñada por Bruce Marshall siendo parte del cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos, este método es un experimento de laboratorio dirigido al diseño de una adecuada mezcla asfáltica por medio del análisis de su estabilidad, fluencia, densidad y vacíos.

Una de las virtudes de este método es la importancia que se asigna a las propiedades densidad/vacios del material asfáltico. Este análisis permite garantizar que las proporciones volumétricas de los componentes de la mezcla estén dentro de los rangos adecuados para asegurar una mezcla durable, desafortunadamente su gran desventaja es su método de compactación de laboratorio el cual se realiza por impacto, el que no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real.

**1.2.2 Superpave.** Este método resulta del desarrollo de un Programa Estratégico de Investigaciones de Carreteras SHRP (Strategic Highway Research Program) entre los años de 1987 y 1993 en el cual participaron: Estados Unidos, Canadá, México y algunos países de Europa. El programa dirigió una gestión de investigación para el desarrollo de nuevas especificaciones, ensayos y normas de diseño para materiales asfálticos.

El sistema Superpave proporciona: nuevas especificaciones para asfaltos y agregados, nuevos métodos de diseño de mezclas asfálticas y nuevos modelos de predicción del comportamiento, enfocado en producir una mezcla que se comporte adecuadamente, el primer paso del análisis Superpave involucra la selección cuidadosa de los materiales y el proporcionamiento volumétrico de los mismos.

Los niveles superiores de análisis requieren la utilización de sofisticados ensayos, gran parte de los cuales aún están siendo perfeccionados. Estos niveles apuntan a determinar con precisión el comportamiento futuro de la estructura del pavimento ante variables como el clima y el tráfico.

**1.2.3 LPC.** Este método fue desarrollado por el LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) que es una organización francesa de carácter científico y tecnológico para la de investigación aplicada y el desarrollo, que funciona bajo la

supervisión del Ministro de Obras Públicas y el Ministro de Investigación de Francia.

Se caracteriza por ser un método fundado, en lo posible, en el comportamiento de la mezcla e incluye características de los constituyentes tales como la sensibilidad al agua, el porcentaje de vacíos en la Prensa de Cizallamiento Giratorio, la resistencia al ahuellamiento, al módulo de rigidez y a la resistencia a la fatiga.

En este manual se encuentra desde las definiciones de los ensayos realizados y los materiales usados, la fabricación de probetas, la puesta a punto de las mezclas, recomendaciones para optimizar las características del material y relaciones entre las características de laboratorio y las obtenidas en campo, entre otras, Toda la información allí consignada se fundamenta en la experiencia de la red LPC, en trabajos de investigación realizados sobre los materiales estructurales, casos concretos, sobre experiencias específicas o hacen llamado a referencias bibliográficas.

**1.2.4 Hveem.** Este implica análisis de densidad, estabilidad y la resistencia de la mezcla a la expansión por la presencia del agua al igual que en el método Marshall. El método Hveem tiene dos ventajas concretas las cuales son su método de compactación por amasado y una segunda que se refiere al parámetro de resistencia-estabilidad.

La desventaja del procedimiento Hveem es el equipo de ensayo, en particular el de compactación por amasado y el estabilímetro de Hveem (figura 2), que son más costosos que el equipamiento del procedimiento Marshall y poco portables, además algunas propiedades volumétricas relacionadas con la durabilidad de la mezcla no son rutinarias, teniendo en cuenta también que el método de selección del contenido de asfalto es demasiado subjetivo y podría resultar en una mezcla no muy durable con poco asfalto.

**Figura 2. Estabilimetro de Hveem**



Fuente: [http://www.racperu.com/catalogos/asfalto\\_estabilidad\\_hveem.pdf](http://www.racperu.com/catalogos/asfalto_estabilidad_hveem.pdf)

## CAPITULO II. PROPIEDADES DE LOS COMPONENTES

Como se ha comentado anteriormente, las mezclas bituminosas están formadas por una combinación de un ligante hidrocarbonado, áridos (incluido el polvo mineral) y, eventualmente aditivos, de manera que todas las partículas del árido quedan recubiertas por una película homogénea de ligante.

### 2.1. ARIDOS

El árido es un conjunto de partículas minerales de distintos tamaños que proceden de la fragmentación natural o artificial de las rocas. Aunque habitualmente se considera su naturaleza inerte y discreta, cada día cobra mayor importancia su actividad química y superficial frente al agua y a los ligantes bituminosos. Normalmente los áridos utilizados en carreteras proceden de la explotación de canteras y graveras. Entre los áridos artificiales tenemos escorias granulares de altos hornos, cenizas volantes de centrales térmicas y algún otro fabricado con procedimientos especiales o bien como subproductos de algunas industrias.

**Figura 3. Material granular**



Fuente: [www.umng.edu.co/www/images/\\_granulometria%2520\(agregados%2520petreos\).jpg](http://www.umng.edu.co/www/images/_granulometria%2520(agregados%2520petreos).jpg)

Los áridos pueden ser grueso, árido fino y polvo mineral. El porcentaje de cada fracción de árido viene determinado según el tipo de mezcla.

El comportamiento de un árido depende de las propiedades físicas y químicas de las partículas, así como de su granulometría. Las propiedades físico-químicas de los áridos dependen de la roca de origen, y aunque difícilmente se puede actuar sobre ellas, la composición de un árido con materiales procedentes de distintas rocas y los procesos de trituración pueden proporcionar áridos adecuados. Respecto a la granulometría, ésta debe componerse o corregirse en cada caso.

**a. Propiedades físicas de las partículas.**

- **Porosidad.** El número, tamaño, distribución, continuidad y accesibilidad de los poros son factores que influyen directamente sobre la permeabilidad, absorción, peso específico aparente, textura superficial, resistencia a la helada y generalmente también en la dureza, resistencia y el pulimento de las partículas.
- **Peso específico real.** Es el peso específico de su propio material mineral, prescindiendo de todos los poros accesibles o no accesibles desde el exterior. Suele ser un valor bastante característico de la composición mineralógica y naturaleza de la roca.
- **Textura superficial.** Está determinada por las irregularidades superficiales de las partículas. Ésta puede variar desde ser muy rugosa hasta pulida, según sean las irregularidades apreciables o prácticamente inexistentes. Influye de manera decisiva en el rozamiento interno del esqueleto mineral. Además tiene influencia en la resistencia al deslizamiento de los neumáticos en la superficie de rodadura.
- **Forma.** Afecta principalmente a la resistencia mecánica de las partículas, y por lo tanto, al esqueleto mineral del árido. Las partículas pueden ser redondeadas o angulosas, y a su vez, pueden ser cúbicas, lascas o agujas.

**Figura 4. Forma de los agregados**



Fuente: [http://es.123rf.com/photo\\_1457496.html](http://es.123rf.com/photo_1457496.html)

- **Dureza.** Es una característica que depende de la petrografía del árido, pero que se puede evaluar indirectamente, por ejemplo, mediante la resistencia al desgaste.

Además existen muchas más propiedades entre las que se destacan la friabilidad, el peso específico aparente, la absorción y la resistencia a compresión.

**b. Propiedades químicas de las partículas.** Si los áridos fueran de dimensiones apreciables y con las superficies limpias de polvo mineral, materia orgánica, etc., la posibilidad de reacción química con agentes exteriores o desintegración química sería función únicamente de la naturaleza de aquellos agentes y de la propia composición de la roca.

Las reacciones fisicoquímicas tienen una gran importancia en la adhesividad de los áridos ante los productos bituminosos usuales. La adhesividad de la superficie de los áridos a los ligantes bituminosos es un fenómeno complejo en el que intervienen diversos factores físicos como la textura del árido, porosidad, viscosidad, tensión superficial del ligante, espesor de la película de ligante, pero también factores químicos del árido. Si los áridos están absolutamente secos, se dejan mojar fácilmente por los ligantes bituminosos pero si están con algo de

humedad sus superficies presentan cierta polaridad. Esta polaridad tendrá un signo u otro dependiendo de la naturaleza de los áridos, según sean ácidos o básicos.

## 2.2. LIGANTES

Los ligantes hidrocarbonatos son aglomerantes constituidos por mezclas complejas de hidrocarburos. Tienen carácter termoplástico que hace que su consistencia dependa de la temperatura. A elevadas temperaturas es un fluido newtoniano.

Dentro de estos ligantes se tienen los betunes asfálticos, betunes fluidificados o fluxados, emulsiones bituminosas y ligantes modificados.

**Figura 5. Ligante asfáltico**



Fuente: [www.urbacom.eu/images/Gt\\_1205.jpg](http://www.urbacom.eu/images/Gt_1205.jpg)

Los betunes asfálticos son subproductos de las refinerías de petróleo. Es un sistema coloidal tipo gel que a temperatura ambiente es sólido o semisólido, con lo cual requiere un calentamiento previo.

Los betunes fluidificados o fluxados son una disolución de betún asfáltico en un fluidificante. En el caso de los betunes fluidificados la disolución es en aceite o en un fluidificante derivado del petróleo. En los betunes fluxados el fluidificante no es derivado del petróleo, sino que procede de la destilación de la hulla (carbón mineral).

Las emulsiones bituminosas son dispersiones coloidales de betún asfáltico en agua. A temperatura ambiente es líquido.

Los ligantes modificados son ligantes hidrocarbonados a los que se añaden aditivos para modificar la reología de la mezcla. En carreteras el principal tipo de ligante son los betunes asfálticos.

Las propiedades de un asfalto pueden influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. En una mezcla que contenga la misma granulometría y el mismo tipo de agregados pétreos, con un mismo contenido de asfalto e igual contenido de vacíos, puede ser resistente o no a las deformaciones plásticas en función de las propiedades del ligante asfáltico que se le añada a la mezcla aunque sea de similar penetración. La componente elástica del ligante asfáltico contribuye a aumentar el comportamiento elástico de la mezcla, de igual forma, el ligante influye decisivamente en la componente viscosa y su mayor presencia dentro de la mezcla hace que aumente esta componente.

## CAPITULO III. CARACTERIZACIÓN EN LABORATORIO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS

### 3.1. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA

Las propiedades volumétricas de las mezclas asfálticas compactadas forman parte fundamental en la selección del contenido óptimo de asfalto. Los parámetros más importantes son; los vacíos de aire ( $V_a$ ), vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenados con asfalto ( $V_{FA}$ ), y contenido de asfalto efectivo, estos proporcionan una indicación del probable funcionamiento de la mezcla asfáltica y son determinantes para alcanzar un comportamiento satisfactorio del pavimento a largo plazo.

La norma de ensayo I.N.V.E – 799-07 del Instituto Nacional de Vías de Colombia para la construcción de vías proporciona los procedimientos para llevar a cabo el análisis volumétrico.

Para la determinación de cada uno de los parámetros volumétricos, se deben calcular la Gravedad Específica Neta y la Gravedad Especifica del Agregado, así:

- **Gravedad Específica Neta.** Es la relación entre la masa (o peso seco en el aire) de un volumen de mezcla total (teniendo en cuenta los vacíos que quedan entre las partículas recubiertas con asfalto) y la masa de un volumen igual de agua a una temperatura establecida. Su valor es adimensional.

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde,  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  corresponden al porcentaje de cada fracción (grueso, fino, polvo mineral) respecto al peso total del agregado y  $G_b$ ,  $G_1$ ,  $G_2$  y  $G_3$  son las gravedades específicas del ligante y de cada fracción de agregado respectivamente.

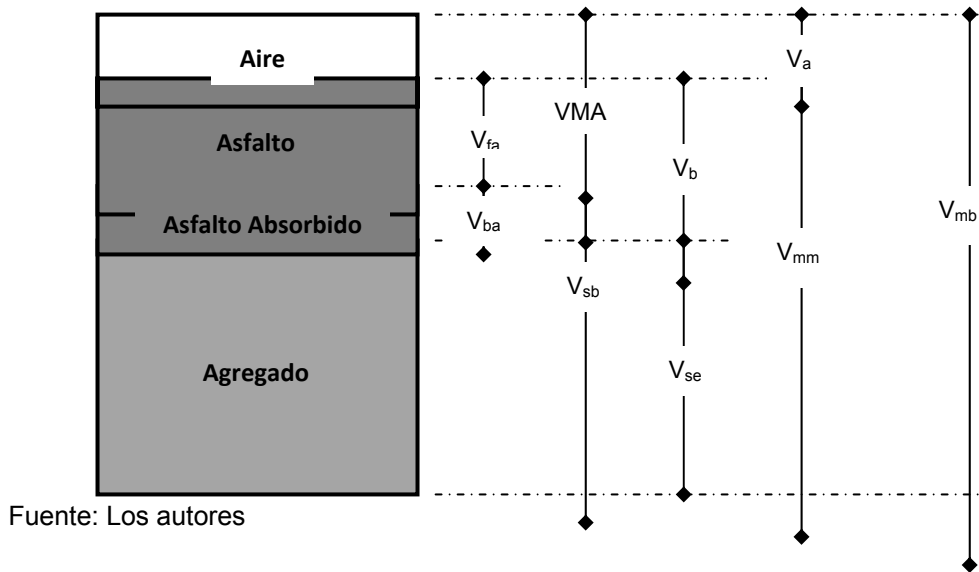
- **Gravedad Especifica del Agregado.** La relación entre la masa en estado seco (o el peso seco en el aire) de una unidad de volumen de agregado, incluyendo los vacíos permeables no llenos de asfalto y los impermeables, o sea excluyendo los vacíos permeables al asfalto, y la masa de un igual volumen de agua, ambos a la misma temperatura establecida.

$$G_{se} = \frac{100 - P_b}{\frac{100}{G_{mm}} - \frac{P_b}{G_b}} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

Donde  $G_{mm}$  es la gravedad específica máxima teórica de la mezcla compactada y  $P_b$  es el porcentaje de ligante asfáltico respecto al peso total de la mezcla.

En la Figura 6 se presenta un diagrama de componente de una mezcla asfáltica compactada.

**Figura 6. Componentes volumétricos de mezclas asfálticas compactadas**



Fuente: Los autores

- **Volumen total de la mezcla asfáltica  $V_{mb}$ .** Volumen total del cuerpo de prueba que depende del método de medida.
- **Volumen de vacíos en agregado mineral  $VMA$ .** Espacio disponible en la mezcla granular. Representa la suma del volumen ocupado por el ligante libre y el volumen de los vacíos. Es expresado en porcentaje con relación al volumen total de la mezcla.

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}} \quad (\text{Ecuación 3.3})$$

- **Volumen de la mezcla asfáltica sin vacíos  $V_{mm}$ .** Volumen de la mezcla granular, (ligante, ligante absorbido y agregados), excluyendo los vacíos, los poros y los intersticios. Es generalmente expresado en porcentaje con relación al volumen total de la mezcla.

$$V_{mm} = V_{mb} - V_a \quad (\text{Ecuación 3.4})$$

- **Volumen de vacíos llenados con asfalto  $V_{fa}$**  . Corresponde al volumen de ligante que no es absorbido por el agregado y que ocupa espacios vacios en la mezcla.

$$V_{fa} = \frac{VMA - V_a}{VMA} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.5})$$

- **Volumen de vacíos de aire  $V_a$**  . Volumen de los poros y los intersticios de la mezcla.

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.6})$$

- **Volumen de asfalto absorbido  $V_{ba}$** , Volumen de asfalto que penetra en los poros del agregado y cuya absorción depende de la porosidad del mismo. Puede ser apreciado a partir de la diferencia entre la masa volumétrica efectiva calculada por mezcla y la masa volumétrica efectiva medida sobre la mezcla.

$$V_{ba} = \frac{G_b(G_{se} - G_{sb})}{G_{sb}G_{se}} * 100 \quad (\text{Ecuación 3.7})$$

- **Volumen de asfalto  $V_b$** . Volumen total de la mezcla donde hay contenido de ligante.

$$V_b = P_b - \frac{V_{ba}P_s}{100} \quad (\text{Ecuación 3.8})$$

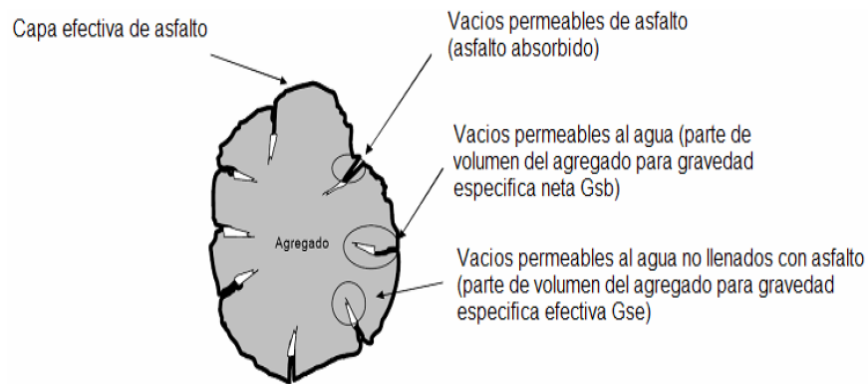
Donde  $P_s$  es el porcentaje de agregado respecto al peso total de la mezcla.

- **Volumen de agregado mineral  $V_{sb}$** . Volumen total de agregados que conforman la mezcla. Estos son vacios permeables al agua. Se puede cuantificar conociendo el peso del material y su Gravedad especifica.
- **Volumen de agregado mineral efectivo  $V_{se}$** . Cantidad de agregado mineral que no absorbe ligante. Este volumen corresponde a la parte del agregado

permeable al agua pero que no están llenos de ligante. Se calcula en función de la gravedad específica efectiva.

En la figura 7, se puede observar la forma en que ligante es absorbido por el agregado.

**Figura 7. Parámetros de diseño volumétrico**

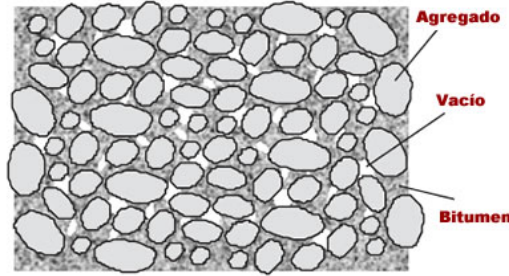


Fuente: Zapata, F. 2000

El porcentaje de vacios es uno de los criterios usados para determinar el contenido óptimo de ligante en las mezclas asfálticas. Éste debe ser bajo, para aumentar los puntos de contacto entre las partículas que componen la mezcla asfáltica y disminuir la propensión a que las moléculas orgánicas del ligante reaccionen con el oxígeno del aire oxidándose lo que les hace más duros y frágiles, efecto al que se le conoce como envejecimiento oxidativo.

Es importante aclarar que el contenido de vacios no puede ser nulo porque con los aumentos de temperatura el volumen del ligante tiende a incrementarse y pasa a ocupar los espacios llenos de aire. Si no hay vacios, el ligante ocasiona la separación de los agregados disminuyendo los puntos de contacto entre ellos.

**Figura 8. Vacios en la mezcla asfáltica**



Fuente: [www.peru-v.com/ingenieria/images/micro1.jpg](http://www.peru-v.com/ingenieria/images/micro1.jpg)

### **3.2. RIGIDEZ**

La rigidez tiene que ver con la deformabilidad relativa de un material bajo carga. Se le mide por la velocidad del esfuerzo con respecto a la deformación. Mientras mayor sea el esfuerzo requerido para producir una deformación dada, más rígido se considera que es el material.

Para obtener una mezcla asfáltica de alta calidad es indudable que las propiedades de los materiales, el diseño, la producción y la colocación de la mezcla son factores fundamentales. Una de las ventajas más importantes que brindan las mezclas asfálticas, reside en la gran variedad de espesores en que se puede colocar y en los niveles de rigidez que pueden obtenerse, desde unos 1000 MPa hasta más de 10,000 MPa a temperatura ambiente, lo cual les permite adaptarse casi a cualquier situación estructural y ahora con el empleo de los asfaltos modificados también se pueden adaptar con facilidad a cualquier situación climática.

Controlando la rigidez a altas temperaturas, las especificaciones de ligante garantizan que el asfalto provea su mayor aporte a la resistencia global al corte de la mezcla en términos de la elasticidad a altas temperaturas. Así mismo, la

especificación asegura que el ligante no contribuya a la fisuración por fatiga al limitar la rigidez a temperaturas intermedias.

Todos los materiales cambian su forma, volumen o ambos, bajo la influencia de un esfuerzo o un cambio de temperatura. Se dice que la deformación es elástica si el cambio en forma o volumen producido por el esfuerzo o la temperatura se recupera totalmente cuando se permite al material regresar a su temperatura o sistema de esfuerzos originales.

### **3.3. RESISTENCIA ESTRUCTURAL**

La capa de rodadura en un pavimento es la que se encuentra en contacto directo con las cargas generadas por el uso y a su vez hace visible las fallas causadas las mismas. Es por esto que la mezcla asfáltica debe estar en capacidad de resistir las solicitudes de magnitud y repetición de carga impuestas por el tráfico que generan efectos perjudiciales sobre la funcionalidad del pavimento, tales como:

**a. Deformaciones.** El asfalto es un material que puede ser considerado elástico lineal a temperaturas bajas y frecuencias de carga altas, pero muestra propiedades viscosas y plásticas a temperaturas mayores. Debido a este comportamiento, las cargas repetidas del tránsito generan deformaciones permanentes en las capas asfálticas, especialmente durante el periodo de verano.

La deformación permanente, también conocida como plástica, es el deterioro representado por la existencia de una sección transversal de la superficie que ya no ocupa su posición original. Se llama deformación permanente pues representa la acumulación de pequeñas deformaciones producidas con cada aplicación de carga, esta deformación es irrecuperable.

El comportamiento de las mezclas asfálticas con respecto a las deformaciones permanentes depende fuertemente del tipo de ligante utilizado, así como de la composición de la mezcla, forma y tamaño de las partículas, calidad de los agregados y aditivos, cuando estos son empleados.

La temperatura del asfalto es un factor que afecta fuertemente a la deformación plástica. No solo las temperaturas máximas, sino también los gradientes de temperatura pueden tener una influencia sobre la deformación permanente.

Después de la consolidación, al comienzo de la vida de servicio del pavimento, el índice de deformaciones permanentes normalmente decrece con un incremento en las repeticiones de carga, hasta que se vuelve razonablemente constante. Finalmente, el índice de deformación plástica puede comenzar a incrementarse con un aumento en las repeticiones de cargas. Esta última fase ocurre sobre el camino sólo en situaciones extremas, e indican deterioro total.

La acumulación de deformaciones en las capas asfálticas genera el ahuellamiento. Este tipo de deformación es causado por una mezcla asfáltica cuya resistencia al corte está demasiado baja para soportar las cargas pesadas repetidas a las cuales está sometida. A veces el ahuellamiento (roderas) ocurre en una capa superficial débil. En otros casos, la capa superficial no es en si misma propensa al ahuellamiento, pero acompaña la deformación de una capa inferior del pavimento más débil.

**Figura 9. Deformaciones permanentes**



Fuente: [www.udec.cl/~provia/trabajos\\_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf](http://www.udec.cl/~provia/trabajos_pdf/16GmoThenouxAhuellamiento.pdf)

Cuando una mezcla asfáltica se deforma, es evidente que tiene una resistencia al corte. Cada vez que un vehículo aplica una carga, una deformación pequeña, pero permanente se ocasiona. La deformación por corte se caracteriza por un movimiento de la mezcla hacia abajo y lateralmente. Con un número dado de repeticiones de carga aparecerán las roderas.

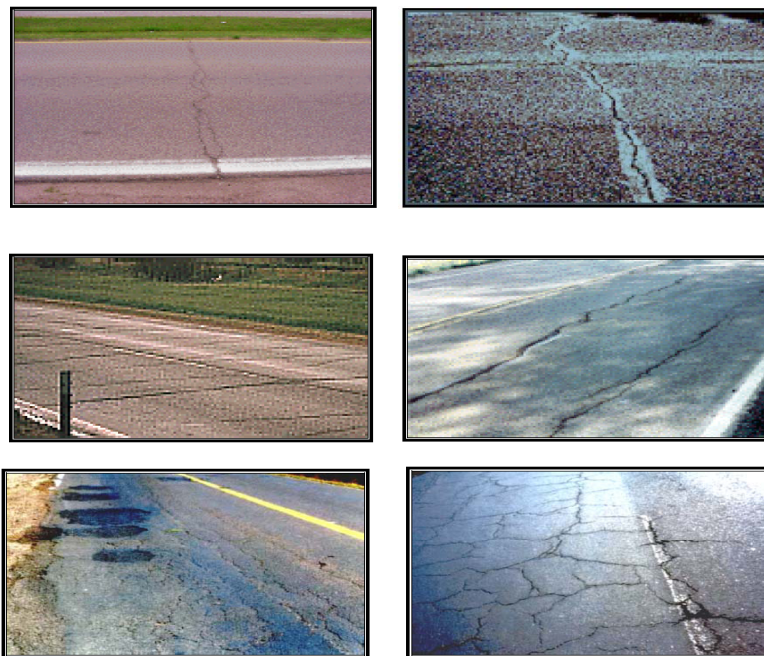
Debido a que el ahullamiento es una acumulación de muy pequeñas deformaciones permanentes, una forma de asegurar que el cemento asfáltico aporte una aceptable resistencia al corte es usar un cemento asfáltico no sólo duro sino de comportamiento lo más próximo posible a un sólido elástico a altas temperaturas del pavimento. Así, cuando una carga es aplicada al cemento asfáltico en la mezcla, este tiende a operar como una banda de goma y a recuperar su posición original en lugar de permanecer deformado.

**b. Fatiga.** Aunque generalmente una carga simple no genera grietas en el pavimento, las repeticiones de cargas pueden inducir agrietamientos en las capas confinadas. Los esfuerzos cortante y de tensión, así como las deformaciones en las capas confinadas, causan la formación de microgrietas. Éstas al acumularse con la repetición de cargas pueden generar macrogrietas visibles. Este proceso es llamado fatiga.

El rompimiento por fatiga es causado por numerosos factores que ocurren en forma simultánea. Entre ellos, las cargas pesadas repetidas; deflexiones delgadas bajo ruedas pesadas de carga; deflexiones altas asociadas a la tensión horizontal en la superficie de la capa de asfalto y mal drenaje, generado por una construcción pobre y un mal diseño del pavimento.

Frecuentemente, el rompimiento por fatiga es meramente un signo de que el pavimento ha sobrepasado el número de aplicaciones de carga para el cual fue diseñado y en este caso el pavimento sólo necesitará una rehabilitación planificada. Consecuentemente, los mejores consejos para prevenir el rompimiento por fatiga son: un diseño adecuado de la cantidad de cargas pesadas, mantener la subrasante seca, utilizar pavimentos más gruesos utilizar materiales de pavimentación no susceptibles a la humedad, y utilizar mezclas asfálticas elásticas que soporten las deflexiones normales.

**Figura 10. Agrietamientos y fisuras por fatiga**



Fuente: [www.asfaltogravayterracerias.com.mx/Portals/0/imagenes/grietas2.jpg](http://www.asfaltogravayterracerias.com.mx/Portals/0/imagenes/grietas2.jpg)

Algunas de las causas que generan fatiga:

- Las grietas se producen por unas tensiones mayores que la tensión de rotura de la mezcla.
- Las grietas comienzan en la zona donde la tracción por flexión es máxima y progresan bajo las cargas repetidas. Se suele formar un mapa de grietas formado por un conjunto de grietas longitudinales y transversales.
- Los cambios extremos de temperaturas pueden causar en un pavimento cambios de volumen que producen grietas térmicas que, usualmente son transversales.
- La combinación de grietas longitudinales y de transversales, puede formar elementos o losas rectangulares independientes. Aunque la causa de este agrietamiento no sea debido a las cargas, una vez producido, las sollicitaciones del tráfico incrementarán severamente el deterioro al haber perdido las capas su continuidad física y resistente.

## CAPITULO IV. METODOS DE FORMULACIÓN

La historia del diseño de mezclas asfálticas se remonta a tiempos de antaño cuando los efectos de los neumáticos empezaron a producir serios problemas en las carpetas de rodadura.

En la actualidad existen diversos métodos utilizados para llegar a la consecución óptima de una fórmula que represente los efectos ocurridos durante su vida de servicio, el método más representativo para este propósito es el Marshall, ocasionando por esta razón que sea el más aplicado.

El afán por perfeccionar y obtener una fórmula más idónea para tal fin hizo que diversos países incorporen nuevos estudios sobre formulación entre los que encontramos el método Superpave y un manual LPC para la formulación de mezclas asfálticas, en la tabla siguiente se muestra un resumen de los países que están incorporando estas metodologías.

**Tabla 1. Uso de los métodos según el país**

|                       | <b>MARSHALL</b> | <b>SUPERPAVE</b> | <b>LPC</b> |
|-----------------------|-----------------|------------------|------------|
| <i>Estados Unidos</i> | ✓               | ✓                |            |
| <i>Canadá</i>         | ✓               | ✓                |            |
| <i>México</i>         | ✓               | ✓                |            |
| <i>Chile</i>          | ✓               | ✓                |            |
| <i>Perú</i>           | ✓               | ✓                |            |
| <i>Francia</i>        | ✓               |                  | ✓          |
| <i>Unión Europea</i>  | ✓               |                  | ✓          |

Fuente: Los autores

#### **4.1. MARSHALL**

La creación de este método nace como respuesta a un importante problema de construcción de aeropuertos militares en todos los frentes de batalla durante la segunda guerra mundial, por parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos de Norteamérica.

En ese momento el Cuerpo de ingenieros tenía un tipo de ensayos simples, y esquemas de trabajo para los proyectos y el control de calidad de campo para pavimentos asfálticos.

Carecían también, de un criterio racional para la determinación del contenido óptimo de asfalto en mezclas que serian sometidas a enormes cargas por los aviones y vehículos militares.

Teniendo en cuenta estos problemas, iniciaron un estudio para seleccionar aparatos de ensayo simples y de fácil transporte que podría ser usado en campo como control de calidad. La segunda fase de este estudio era determinar un método de compactar cuerpos de prueba en laboratorio, cuyos valores de densidad fueran comparables y compatibles con aquellos obtenidos en campo. La tercera fase de esa búsqueda era naturalmente el establecimiento de un criterio de proyecto racional de ensayos previos de control.

Así fue como el cuerpo de ingenieros adopto un aparato y método de proyecto de mezclas asfálticas, concebido por Bruce G. Marshall del Departamento de Caminos del estado de Mississippi.

A fin de determinar un método de laboratorio para la compactación de los cuerpos sometidos a prueba y para un criterio de seguridad de las propiedades de ciertas mezclas con el ensayo de Marshall, fue necesario construir un gran número de

pistas experimentales, en las cuales se variaban el porcentaje de asfalto y la granulometría de los agregados. Trenes tipo fueron aplicados a estas pistas experimentales un gran número de veces, para determinar el efecto de compactación por el propio tráfico.

El Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, después de una extensiva investigación y estudios de correlación, mejoró y adicionó ciertos aspectos al procedimiento de prueba Marshall, a la vez que desarrolló un criterio de diseño de mezclas.

El propósito de este método es determinar el contenido óptimo de asfalto para una combinación específica de agregados. El método también da información sobre propiedades de la mezcla asfáltica en caliente y establece densidades y contenidos óptimos de vacío que deben ser cumplidos durante la construcción del pavimento.

El método original únicamente es aplicable a mezclas asfálticas en caliente para pavimentación, que contengan agregados con un tamaño máximo de 25 mm (1") o menor. El método Marshall modificado se desarrolló para tamaños máximos arriba de 38 mm (1.5"), y está pensado para diseño en laboratorio y control en campo de mezclas asfálticas en caliente, con graduación densa. Debido a que la prueba de estabilidad es de naturaleza empírica, la importancia de los resultados en términos de estimar el comportamiento en campo se pierde cuando se realizan modificaciones a los procedimientos estándar.

El método Marshall utiliza probetas de prueba estándar de 63.5 mm (2 ½") de alto y 101.6 mm (4") de diámetro; se preparan mediante un procedimiento para calentar, combinar y compactar mezclas de asfalto- agregado (ASTM D1559). Los dos aspectos principales del método Marshall son la densidad, análisis de vacíos, y la prueba de estabilidad y flujo de los especímenes compactados; cabe

mencionar que este proceso de diseño no tiene especificado pruebas para agregados minerales ni para cementos asfálticos.

**4.1.1. Selección de los Componentes.** La primera preparación para los ensayos consta de reunir muestras del asfalto y del agregado que van a ser usados en la mezcla de pavimentación. Es importante que las muestras de asfalto tengan características idénticas a las del asfalto que va a ser usado en la mezcla final. Lo mismo debe ocurrir con las muestras de agregado. La razón es simple: los datos extraídos de los procedimientos de diseño de mezclas determinan la fórmula para la mezcla de pavimentación. La receta será exacta solamente si los ingredientes ensayados en el laboratorio tienen características idénticas a los ingredientes usados en el producto final.

Una amplia variedad de problemas graves, que van desde una mala trabajabilidad de la mezcla hasta una falla prematura del pavimento, son el resultado histórico de variaciones ocurridas entre los materiales ensayados en el laboratorio y los materiales usados en la realidad.

**a. Granulometría.** La granulometría del agregado obtenido mediante la combinación de las distintas fracciones, incluido el llenante mineral, deberá estar comprendida dentro de alguna de las franjas fijadas en la tabla No 2. El análisis granulométrico se deberá efectuar de acuerdo con la norma INV E-213.

**Tabla 2. Granulometría Marshall**

| Tipo de Mezcla |       | Tamiz (mm / U.S. Standard) |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
|----------------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                |       | 37.5                       | 25.0  | 19.0  | 12.5  | 9.5   | 4.75  | 2.00  | 0.425 | 0.180 | 0.075  |
|                |       | 1½"                        | 1"    | ¾"    | ½"    | ⅜"    | No.4  | No.10 | No.40 | No.80 | No.200 |
|                |       | % Pasa                     |       |       |       |       |       |       |       |       |        |
| Densa          | MDC-1 |                            | 100   | 80-95 | 67-85 | 60-77 | 43-59 | 29-45 | 14-25 | 8-17  | 4-8    |
|                | MDC-2 |                            |       | 100   | 80-95 | 70-88 | 49-65 | 29-45 | 14-25 | 8-17  | 4-8    |
|                | MDC-3 |                            |       |       |       | 100   | 65-87 | 43-61 | 16-29 | 9-19  | 5-10   |
| Semidensa      | MSC-1 |                            | 100   | 80-95 | 65-80 | 55-70 | 40-55 | 24-38 | 9-20  | 6-12  | 3.7    |
|                | MSC-2 |                            |       | 100   | 80-95 | 65-80 | 40-55 | 24-38 | 9-20  | 6-12  | 3.7    |
| Gruesa         | MGC-0 | 100                        | 75-90 | 65-85 | 47-67 | 40-60 | 28-46 | 17-32 | 7-17  | 4-11  | 2-6    |
|                | MGC-1 |                            | 100   | 75-95 | 55-75 | 40-60 | 28-46 | 17-32 | 7-17  | 4-11  | 2-6    |
| Alto Módulo    | MAM   |                            | 100   | 80-95 | 65-80 | 55-70 | 40-55 | 24-38 | 10-20 | 8-14  | 6-9    |

Fuente: Instituto Nacional de Vías

**b. Preparación del Agregado.** La relación viscosidad-temperatura del cemento asfáltico que va a ser usado debe ser ya conocida para poder establecer las temperaturas del mezclado y compactación en el laboratorio. En consecuencia, los procedimientos preliminares se enfocan hacia el agregado, con el propósito de identificar exactamente sus características. Estos procedimientos incluyen secar el agregado, determinar su peso específico, y efectuar un análisis granulométrico por lavado.

**c. Secado del Agregado.** El Método Marshall requiere que los agregados ensayados estén libres de humedad, tan práctico como sea posible. Esto evita que la humedad afecte los resultados de los ensayos. Una muestra de cada agregado a ser ensayado se coloca en una bandeja, por separado, y se calienta en un horno a temperatura de 110 ° C (230 ° F). Después de cierto tiempo, la muestra caliente se pesa, y se registra su valor.

La muestra se calienta por segunda vez, y se vuelve a pesar y a registrar su valor. Este procedimiento se repite hasta que el peso de la muestra permanezca

constante después de dos calentamientos consecutivos, lo cual indica que la mayor cantidad posible de humedad se ha evaporado de la muestra.

**d. Análisis Granulométrico por Vía Húmeda.** El análisis granulométrico por vía húmeda es un procedimiento usado para identificar las proporciones de partículas de tamaño diferente en las muestras del agregado. Esta información es importante porque las especificaciones de la mezcla deben estipular las proporciones necesarias de partículas de agregado de tamaño diferente, para producir una mezcla en caliente final con las características deseadas.

El análisis granulométrico por vía húmeda consta de los siguientes pasos:

- 1) Cada muestra de agregado es secada y pesada.
- 2) Luego cada muestra es lavada a través de un tamiz de 0.075mm (No. 200), para remover cualquier polvo mineral que este cubriendo el agregado.
- 3) Las muestras lavadas son secadas siguiendo el procedimiento de calentado y pesado descrito anteriormente.
- 4) El peso seco de cada muestra es registrada. La cantidad de polvo mineral puede ser determinada si se comparan los pesos registrados de las muestras antes y después del lavado.

**e. Determinación del Peso Específico.** El peso específico de una sustancia es la proporción peso-volumen de una unidad de esta sustancia comparada con la proporción peso-volumen de una unidad igual de agua. El peso específico de una muestra de agregado es determinado al comparar el peso de un volumen dado de agregado con el peso de un volumen igual de agua, a la misma temperatura. El peso específico del agregado se expresa en múltiplos peso específico del agua (la cual siempre tiene un valor de 1). Por ejemplo una muestra de agregado que pese

dos y media veces más que un volumen igual de agua tiene un peso específico de 2.5.

El cálculo del peso específico de la muestra seca de agregado establece un punto de referencia para medir los pesos específicos necesarios en la determinación de las proporciones agregadas, asfalto, y vacíos que van a usarse en los métodos de diseño.

**4.1.2. Fabricación de Probetas.** Las probetas de ensayo de las posibles mezclas de pavimento son preparadas haciendo que cada una contenga una cantidad diferente de asfalto. El margen de contenido de asfalto usado en las probetas está determinado con base en experiencia previa con los agregados de la mezcla. Este margen da un punto de partida para determinar el contenido exacto de asfalto de la mezcla final. La proporción de agregado en las mezclas esta formulada por los resultados del análisis granulométrico.

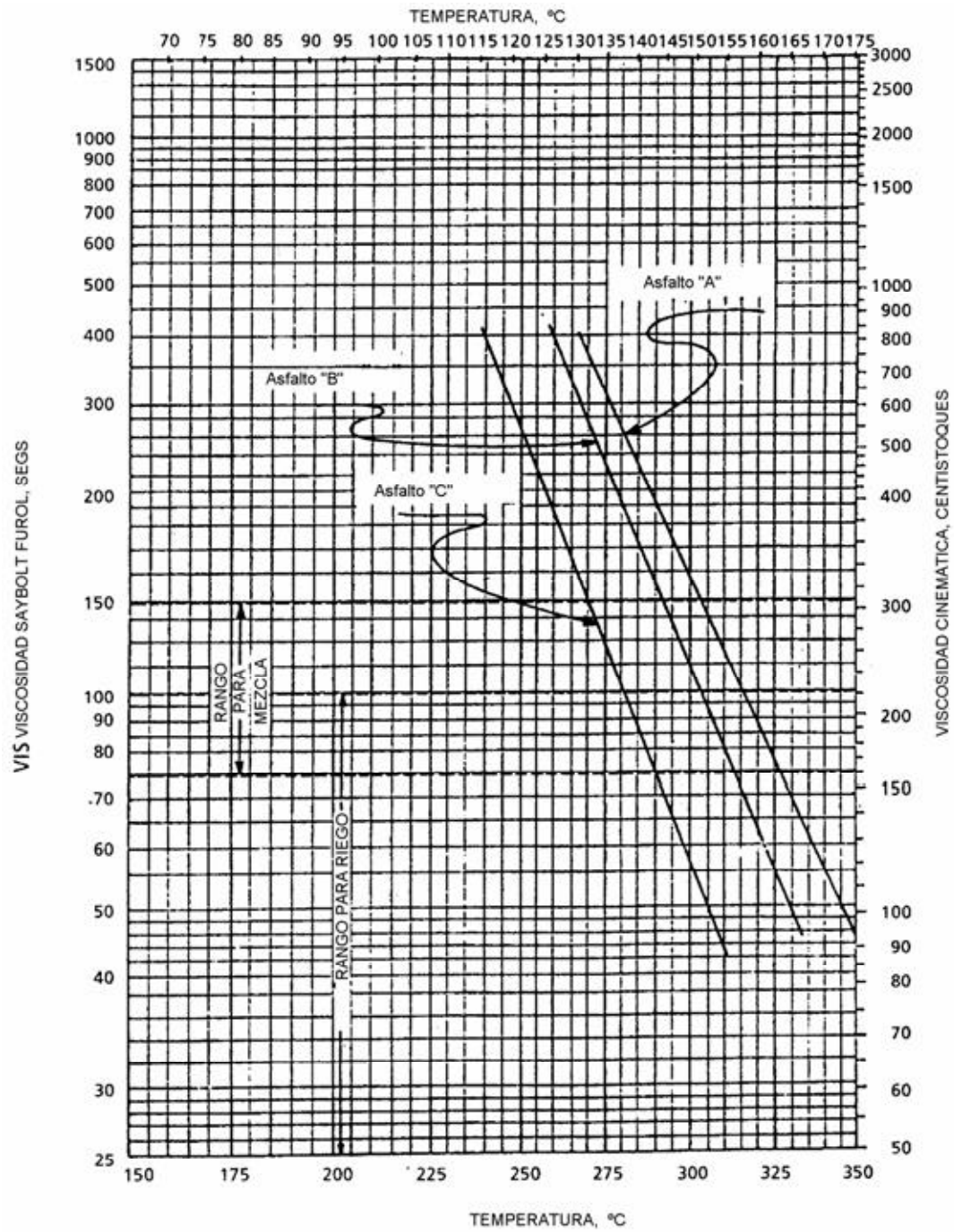
Como mínimo, se prepararán tres probetas para cada contenido de asfalto. Así pues, un diseño con seis contenidos de asfalto, necesitará, entonces, por lo menos dieciocho (18) probetas. Para cada probeta se necesitan aproximadamente 1200 g de ingredientes: para una serie de muestras de una gradación dada resulta conveniente disponer de unos 23 kg (50 lb) de agregados y alrededor de 4 litros (1 galón) de cemento asfáltico. Se requiere, además, una cantidad extra de materiales para análisis granulométricos y para la determinación de las gravedades específicas.

Siendo el método Marshall netamente empírico, los valores de referencia dados en las normas para temperatura, compactación y propiedades de los materiales son resultado de los múltiples experimentos que se realizaron para establecer el método.

**a. Temperatura.** Como es conocido, en un principio la prueba Marshall se originó con el fin de conocer la estabilidad estructural (para las condiciones particulares de la prueba), de una mezcla de concreto asfáltico para construir una carpeta de tipo denso o con una granulometría muy cerrada, en la cual las partículas minerales gruesas se encuentran inmersas en un mortero asfáltico. En esas condiciones, la viscosidad era un factor de gran importancia para la determinación del valor de estabilidad convencional.

Es por eso que las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio están dadas en función de su viscosidad y se determinan utilizando la grafica No. 1 dada por el Instituto Nacional de vías para determinar la temperatura. Los procesos para determinar las viscosidades cinemática y de Saybolt se encuentran en las normas INV E-715-07 y INV E-714-07, respectivamente.

**Gráfica 1. Temperatura vs Viscosidad**



Fue nte:

Instituto Nacional de Vías

Es importante tener en cuenta que no se debe exagerar en el tiempo del calentado de la mezcla asfáltica porque esta se hace quebradiza. Lo recomendable es calentarla durante 3-5 minutos. Además la temperatura mínima a la cual la mezcla debe llegar al sitio de la obra debe ser de 120 °C, caso contrario se corre el riesgo de al ser compactada adquiera una superficie porosa, esto aumenta la posibilidad de oxidación y envejecimiento prematuro del concreto asfáltico.

**b. Proceso de mezclado.** Para simular los procesos de calentamiento y mezclado que ocurren en una planta, el asfalto y el agregado deben ser calentados antes de mezclarse.

Una vez que los materiales se acondicionan cercanos a la temperatura de mezclado, se dosifica el asfalto en peso con respecto a la mezcla total. Posteriormente se procede al cubrimiento del agregado pétreo, manteniendo la temperatura de mezclado dentro del rango especificado hasta que las partículas más gruesas se hayan cubierto totalmente.

**Figura 11. Elaboración de la mezcla**



Fuente: CMT. Características de los materiales

Cuando la mezcla haya alcanzado la temperatura de compactación, se coloca dentro de los moldes donde va ser compactada. Los moldes deberán estar calientes, así como los demás accesorios que se utilicen en el vaciado y acomodo de la mezcla, con el fin de evitar una reducción de temperatura de la mezcla asfáltica, previa a su compactación.

**c. Compactación.** Para el caso del método Marshall, la compactación de la mezcla asfáltica caliente se hace por medio de un martillo de impacto, como el mostrado a continuación:

**Figura 12. Martillo de compactación**



Fuente: Ingetest Ltda

El Martillo de Compactación debe contar con una cara de impacto de 98 mm (3.7/8 pulgadas) de diámetro. Mango para servicio pesado, en fundición de aluminio. Además de un Martillo de 4.54 Kg (10 libras), con caída de 457 mm (18 pulgadas) de construcción acerado y chapado para su resistencia a la oxidación y larga duración.

Una vez se encuentra armado el sistema, se inicia la compactación mediante golpes del martillo, el número de golpes depende la cantidad de tránsito para la cual la mezcla está siendo diseñada. Ambas caras de cada probeta reciben el mismo número de golpes. Después de completar la compactación las probetas son enfriadas y extraídas de los moldes.

Estudios realizados indican que el propósito de la compactación es optimizar el paquete de agregados para una distribución uniforme de bitumen y vacíos. Lo cual tiene los siguientes propósitos:

- ✓ Asegurar una buena adherencia entre bitumen y agregados.
- ✓ Conseguir una alta fricción entre los agregados.
- ✓ Incrementar la resistencia a la deformación.
- ✓ Lograr una mayor durabilidad.
- ✓ Disminuir los riesgos de penetración de agua, desgaste, resquebrajamiento de la carpeta, así como del *patinaje* en la superficie

Este método adoptó este tipo de compactación pues lo que se buscaba era una compactación que se aproximara lo más posible a la realizada en obra e inmediatamente después de la puesta en servicio del pavimento y que requiriera un aparato sencillo que fuera fácilmente utilizable en laboratorios móviles.

Actualmente una de las grandes desventajas de este método es justamente la compactación de laboratorio por impacto ya que no simula la densificación de la mezcla que ocurre bajo tránsito en un pavimento real.

**4.1.3. Selección del Contenido de Ligante.** El ensayo de estabilidad está dirigido a medir la resistencia a la deformación de la mezcla, mientras que el de fluencia mide la deformación, bajo carga, que ocurre en la mezcla.

El procedimiento de los ensayos inicia calentando las probetas en un baño de agua a 60°C, temperatura que representa, normalmente, la temperatura más caliente que un pavimento en servicio va a experimentar.

Después se retira la probeta del agua, se seca y se coloca rápidamente en el equipo Marshall. Este equipo está compuesto por un marco de carga de 44.5 KN (10.000 lbs f), con interruptores de funcionamiento que controlan el movimiento del tornillo de carga. Cuenta con unos medidores que indican que la unidad está en funcionamiento, también indican el momento en que se alcanza el límite del ensayo o carga máxima. Además debe contar con un anillo de carga de 27 KN (6.000 lbs.f) de capacidad y demás accesorios.

**Figura 13. Equipo Marshall**



Fuente: Ingetest Ltda

La carga del ensayo es aplicada a la probeta a una velocidad constante de 51mm por minuto hasta que la muestra falle. La falla está definida como la carga máxima que la probeta pueda resistir.

La carga de falla se registra como el valor de estabilidad Marshall y la lectura del medidor de fluencia se registra como el flujo.

**a. Valor de la estabilidad de Marshall.** El valor de la estabilidad de Marshall es una medida de la carga bajo la cual una probeta cede o falla totalmente. Durante un ensayo, cuando la carga es aplicada lentamente, los cabezales superior e inferior del aparato se acercan, y la carga sobre la probeta aumenta al igual que la lectura en el medidor de flujo. Luego se suspende la carga una vez que se obtiene la carga máxima.

Debido a que la estabilidad de Marshall indica la resistencia de una mezcla a la deformación, existe una tendencia a pensar que si un valor de estabilidad es bueno, entonces un valor más alto será mucho mejor.

Para muchos materiales de ingeniería, la resistencia del material es, frecuentemente, una medida de su calidad; sin embargo, este no es necesariamente el caso de las mezclas asfálticas en caliente. Las estabilidades extremadamente altas se obtienen a costa de la durabilidad.

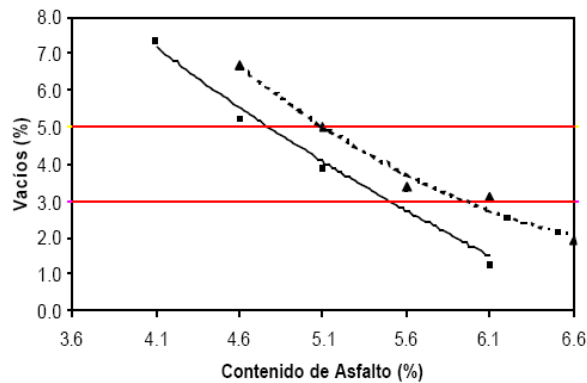
**b. Valor de la fluencia de Marshall,** Se mide en centésimas de pulgada y representa la deformación de la probeta. La deformación está indicada por la disminución en el diámetro vertical de la probeta.

Las mezclas que tienen valores bajos de fluencia y valores muy altos de estabilidad Marshall son consideradas demasiado frágiles y rígidas para un pavimento en servicio. Aquellas que tienen valores altos de fluencia son consideradas demasiado plásticas y tienen tendencia a deformarse fácilmente bajo las cargas de tránsito.

- **Análisis de los resultados.** Con los resultados de los ensayos se trazan gráficas que, usualmente, revelan tendencias en las relaciones entre el contenido de asfalto y las propiedades de la mezcla. Dentro de estas tendencias se pueden encontrar, (la línea punteada muestra los resultados de un ensayo Marshall):

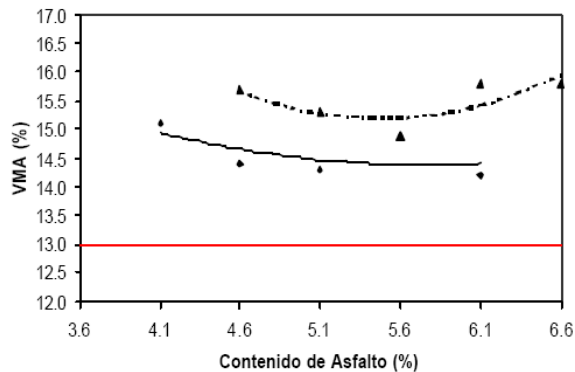
- ✓ El porcentaje de vacios disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto.

**Gráfica 2. Contenido de asfalto vs Vacios**



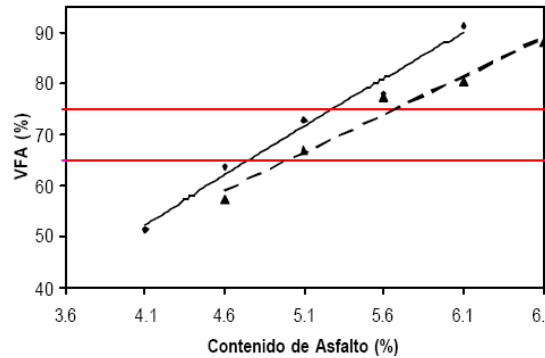
- ✓ El porcentaje de vacios en el agregado mineral generalmente disminuye hasta un valor mínimo y luego aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.

**Gráfica 3. Contenido de asfalto vs VMA**



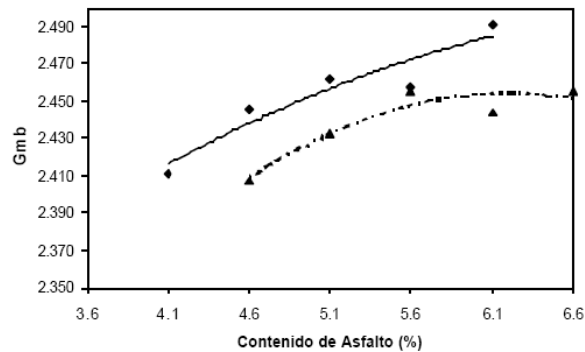
- ✓ El porcentaje de vacíos llenos de asfalto aumenta con aumentos en el contenido de asfalto.

**Gráfica 4. Contenido de asfalto vs VFA**



- ✓ La curva para el peso unitario o densidad de la mezcla es similar a la curva de estabilidad, excepto que el peso unitario máximo se presenta a un contenido de asfalto ligeramente mayor que el que determina la máxima estabilidad.

**Gráfica 5. Contenido de asfalto vs  $G_{mb}$**



- ✓ Hasta cierto punto, los valores de estabilidad aumentan a medida que el contenido de asfalto aumenta. Más allá de éste punto, la estabilidad disminuye con cualquier aumento en el contenido de asfalto.
  
- ✓ Los valores de fluencia aumentan con aumentos en el contenido de asfalto.
  
- **Determinación del contenido de asfalto.** La práctica actual del diseño volumétrico de mezclas asfálticas elaboradas en caliente, recomienda como primer criterio de selección elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 3 – 5% de vacíos de aire ( $V_a$ ), y verificar después que los parámetros volumétricos restantes se encuentren dentro de los rangos establecidos por el método. Si cumple con todos los criterios, es el contenido de diseño de asfalto. Si no cumplen todos, será necesario hacer algunos ajustes o volver a diseñar la mezcla.

El diseño de mezclas seleccionado para ser usado en un pavimento es, generalmente, aquel que cumple, de la manera más económica, con todos los criterios establecidos. Sin embargo, no se deberá diseñar una mezcla para optimizar una propiedad en particular.

## **4.2. SUPERPAVE**

En 1987, el Strategic Highway Research Program (SHRP) fue establecido por el Congreso de los Estados Unidos con un presupuesto de 150 millones de dólares en programas de investigación, a fin de mejorar el desempeño y duración de las carreteras volviéndolas más seguras tanto para automovilistas como para los trabajadores de las mismas.

Un tercio de este presupuesto se empleó en el desarrollo de especificaciones de desempeños basados en asfalto, directamente relacionados con análisis de laboratorio y con aplicaciones en campo.

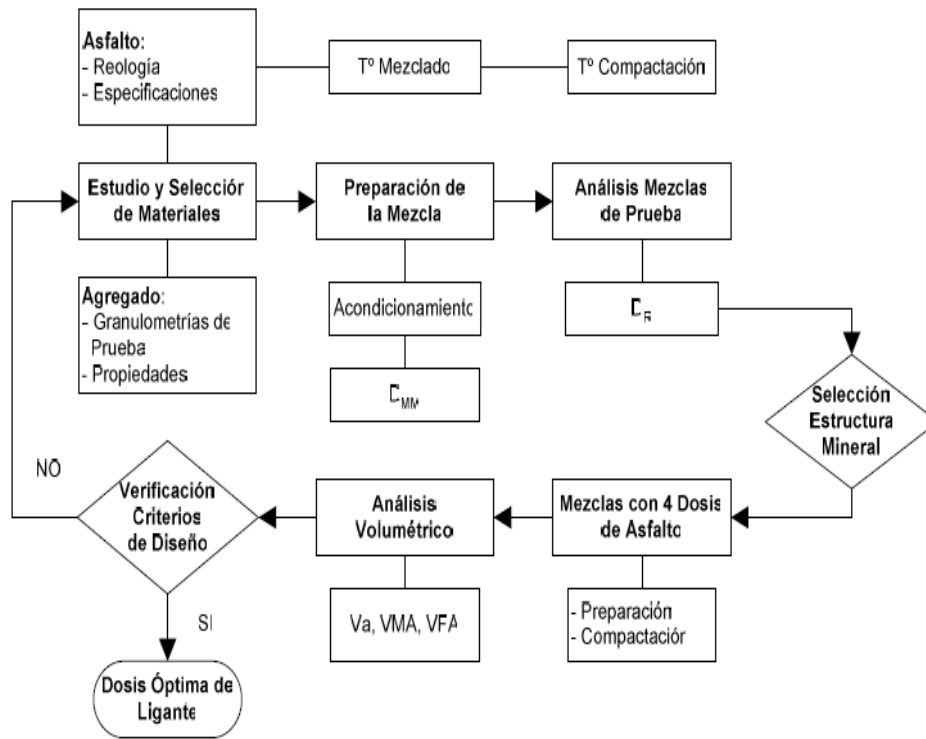
Iniciando el desarrollo de un nuevo sistema para especificar materiales asfálticos, el producto final del programa es un nuevo sistema llamado Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavement*). Representa una tecnología provista de tal manera que pueda especificar cemento asfáltico y agregado mineral; desarrollar diseños de mezclas asfálticas; analizar y establecer predicciones del desempeño del pavimento.

Este método evalúa los componentes de la mezcla asfáltica en forma individual (agregado mineral y asfalto), y su interacción cuando están mezclados.

La característica clave en las especificaciones Superpave es que el criterio de la especificación permanece constante, pero las temperaturas a las cuales el criterio es alcanzado cambian para los diferentes grados de asfalto.

Las nuevas especificaciones para asfaltos y asfaltos modificados desarrolladas por el Programa Estratégico de investigaciones en Caminos SHRP de los EEUU permiten establecer un sistema de clasificación y selección del ligante en función de las condiciones climáticas del lugar. Dichas condiciones expresadas en rangos de temperaturas de diseño del pavimento permiten calcular las propiedades de flujo y deformación de los ligantes para unas condiciones de carga y temperatura adecuadas al proyecto en cuestión.

**Figura 14. Diagrama de flujo Superpave**



Fuente: Bitumix CVV

Estas especificaciones relacionan las propiedades físicas de los asfaltos con principios ingenieriles de manera que por primera vez se está en condiciones de relacionar características reológicas del ligante (elasticidad, plasticidad, viscosidad, hidráulica) con el comportamiento del mismo en servicio, propiedad ésta de suma trascendencia a fin de prever la durabilidad del asfalto.

En las especificaciones SHRP para ligantes el valor del parámetro es siempre constante pero medido a distintas temperaturas. Con ello se logra que se establezca un valor crítico constante de la propiedad a analizar variando la temperatura del ensayo para la cual el valor es alcanzado. Se especifican así

diferentes ligantes para diferentes climas a fin de alcanzar un comportamiento adecuado en todos los climas.

Los ensayos que se realizan en cumplimiento con las nuevas especificaciones SHRP contenidas en el Superpave se basan en medir propiedades fundamentales de los asfaltos, esto es, aquellas que pueden relacionar tensiones y deformaciones en el material. Los módulos complejos y rigidez del asfalto son medidos (no estimados) a las temperaturas de ensayo. Asimismo la deformación a baja temperatura y la viscosidad rotacional a alta temperatura son parte del conjunto de ensayos utilizados.

Con la información de viscosidad rotacional, módulo complejo, módulo de rigidez y deformación a la rotura medidas a temperaturas críticas de servicio se tiene un espectro de características del ligante que permiten confiar en ensayos realizados bajo condiciones que simulan tres etapas críticas por las que pasa el asfalto en servicio, deformaciones permanentes, fatiga y fisuración térmica.

Según los investigadores del programa SHRP, las propiedades medidas por medio de los ensayos para ligantes asfálticos en Superpave, pueden ser relacionados directamente con su comportamiento en el campo por principios de ingeniería. Los ensayos son conducidos también a temperaturas que son encontradas en los pavimentos asfálticos en servicio, para proveer mejor comportamiento del mismo en regiones climáticas especiales. Básicamente la estructura del pavimento, el diseño de la mezcla y las propiedades de la carpeta tal como fue construida junto con las propiedades del ligante, determinan el comportamiento del pavimento durante su vida útil.

Para los ensayos, el asfalto es sujeto a condiciones que simulan las tres condiciones críticas durante la vida del ligante asfáltico. Superpave intenta mejorar el comportamiento de los asfaltos limitando el potencial del ligante de contribuir a

producir en los pavimentos deformaciones permanentes, grietas por fatiga y grietas por bajas temperaturas

Superpave está compuesto por tres niveles. La tabla 3 especifica los distintos niveles de análisis, que dependen de los niveles de tráfico, considerados para el análisis y diseño de las mezclas asfálticas en caliente.

**Tabla 3. Niveles de análisis y diseño de mezclas asfálticas**

| TRAFICO (ESALS)                           | NIVEL DE DISEÑO          | REQUERIMIENTO DE ENSAYO   |
|---|--------------------------|---|
| ESALS < 10 <sup>6</sup>                   | Primer nivel de análisis | Diseño volumétrico  |
| 10 <sup>6</sup> < ESALS < 10 <sup>7</sup> | Análisis intermedio      | Diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento             |
| ESALS > 10 <sup>7</sup>                   | Análisis completo        | Diseño volumétrico y pruebas de predicción del comportamiento adicionales |

Fuente: Bitumix CVV

**a. Primer nivel.** El primer nivel en el sistema Superpave, requiere el Diseño Volumétrico de la Mezcla. Esto involucra:

- ✓ Selección del tipo de asfalto
- ✓ Selección de las propiedades de los agregados.
- ✓ La fabricación de especímenes de ensayo
- ✓ La selección del contenido de asfalto.

Esta actividad está basada en la estimación del contenido de vacíos en la mezcla, vacíos en el agregado mineral (VMA), vacíos llenos de asfalto (VFA), relación polvo mineral/asfalto y su contenido efectivo de asfalto.

**b. Nivel Intermedio.** Utiliza como punto de partida los análisis volumétricos del primer nivel, por lo cual este juega un papel clave en el sistema de análisis y diseño Superpave.

Los ensayos establecidos para el nivel intermedio son:

- ✓ Ensayos de corte (Superpave Shear Test, SST)
- ✓ Ensayos de Tensión indirecta (Indirect Tensile Test, IDT)

Una cantidad de ensayos utilizando equipos SST y IDT, son realizados para lograr una serie de predicciones del comportamiento de la mezcla.

**c. Nivel Avanzado.** Comprende la totalidad de los pasos del análisis intermedio. En este nivel se realizan pruebas adicionales SST y IDT a una amplia variedad de temperaturas. El análisis completo de una mezcla utiliza especímenes confinados SST, y ofrece un mayor y más confiable nivel de predicción del comportamiento de la misma.

Los niveles intermedio y avanzado del Superpave aún se encuentran en proceso de investigación, por lo cual algunos ensayos están actualmente siendo refinados. En conclusión, puede decirse que los resultados de los ensayos de comportamiento realizados en las mezclas asfálticas usando Superpave, permiten al ingeniero estimar el comportamiento del pavimento durante la vida útil, en términos de ejes equivalentes de cargas (ESALs) o contrariamente, estimar la cantidad de ESALs, para alcanzar cierto nivel de resistencia al desplazamiento, a grietas por fatiga o a grietas por bajas temperaturas.

**4.2.1. Selección de los Componentes.** Como se menciono anteriormente en Superpave se consideran como criticas ciertas características de los materiales, las cuales son llamadas de “consenso” y de la “fuente de origen”. Las propiedades de los materiales representan un factor crítico en diseño de mezclas

asfálticas, ya que una mala selección de los materiales pétreos puede ser la diferencia entre el éxito y el fracaso de un proyecto.

En resumen las propiedades más importantes de los agregados pétreos son las siguientes:

- Angularidad (AASHTO T 2793) (grueso, fino)
- Esta prueba tiene como objetivo asegurar un alto grado de fricción interna entre los agregados y por lo tanto evitar la formación de roderas.
- Forma de la partícula (ASTM D 479199) (alargada o lajeada)
- Esta prueba tiene como objetivo evitar el uso de agregados que pueden presentar problemas de fractura durante el manejo, construcción y vida útil. Las fallas que trata de prevenir son deformaciones permanentes y grietas por fatiga.
- Equivalente de arena (ASTM D241995)
- Limita la cantidad de arcilla en el agregado par asegurar un buen contacto agregado- asfalto. Con el objeto de evitar el desgranamiento de la mezcla por perdida de adherencia.

Las especificaciones de Superpave para estas propiedades se basan en el nivel de transito y posición en la estructura del pavimento en donde se pretenda utilizar el agregado.

Las propiedades que dependen del origen de agregado especificadas en Superpave son:

- Abrasión (desgaste de los Ángeles)
- Estima la resistencia a la abrasión y a la degradación mecánica del agregado grueso durante el manejo, construcción y vida útil. Es una condicionante para evitar fallas como: formación de baches y desgranamiento.
- Durabilidad (interperismo acelerado)
- Estima la resistencia del agregado al interperismo para tratar de evitar desgranamiento y formación de baches.
- Material deletéreo
- Es el porcentaje en peso de los contaminantes tales como arcilla, madera, limo etc.

Los agregados como sedimentarios, ígneos o metamórficos, dependiendo la manera como halla sido formado. Los agregados de pavimentación abarcan los agregados naturales. Los agregados procesados, los agregados sintéticos o artificiales y los polvos minerales.

Se debe tener cuidado durante la producción, el acopio, el manejo y el muestreo del agregado, para evitar contaminación, degradación y segregación técnicas especiales han sido desarrolladas para minimizar los efectos que puede ocasionar que un agregado no sea apropiado para ser usado en la pavimentación

Algunas propiedades de especial interés en la pavimentación son la granulometría y el tamaño de la partícula, su limpieza, su dureza, su forma, su textura superficial, su capacidad de absorción y su afinidad con el asfalto.

Ciertos cálculos referentes al agregado, son requisitos en el curso de la producción de mezclas asfálticas en caliente para poder garantizar conformidad con las especificaciones. Esto incluye el análisis granulométrico, los cálculos de proporcionamiento y la determinación del peso específico.

**a. Análisis granulométrico del agregado grueso y fino (AASHTO T 2793).**

Este método cubre la determinación de la distribución por tamaños de partículas del agregado fino y grueso. Este método es utilizado principalmente para determinar la granulometría de los materiales pétreos. Los resultados obtenidos de este método son usados para determinar el cumplimiento de la distribución de las partículas contra los requerimientos de la especificación articular a la cual se designe su uso y proveer la información necesaria de control en la producción de varios agregados o mezclas.

Para especificar la granulometría del agregado, dos conceptos adicionales se emplean:

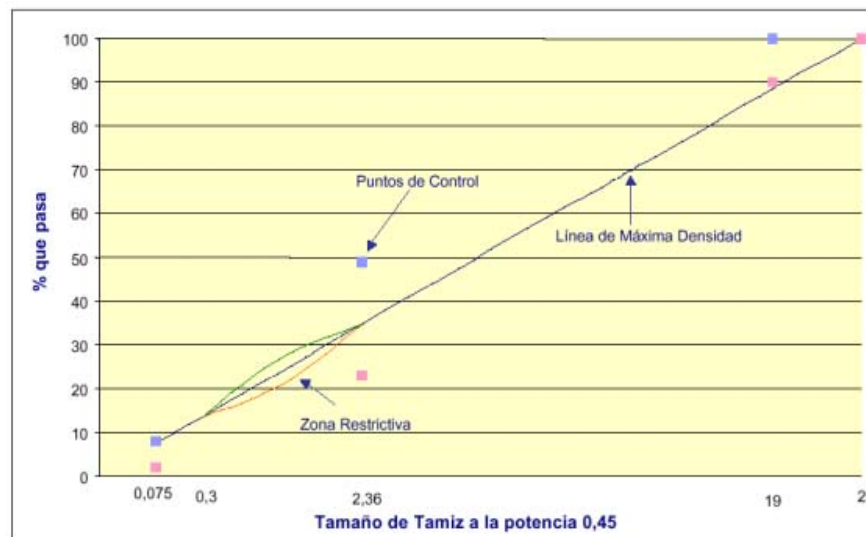
- Puntos de control.
- Una zona restringida.

Los puntos de control son puntos de paso obligado para la curva granulométrica. Corresponden al tamaño máximo nominal, un tamaño intermedio (2.36 mm – No. 8), y un tamaño de polvo (0.075 mm – T200). La zona restringida se ubica entre los tamaños intermedios (4.75 mm ó 2.36 mm) y 0.3 mm (No. 50). Forma una banda que limita el contenido de finos, además Superpave recomienda, sin exigirlo, mezclas que estén gradadas por debajo de la zona restringida. También

recomienda que, si el nivel de tránsito de proyecto aumenta, la granulometría se acerque más a los puntos de control.

Las cartas de control tienen su origen en la ecuación de Fuller, la cual representa condiciones de Máxima densidad y Mínimos vacíos en el agregado mineral (VMA). Sin embargo, a pesar de que con el uso de la ecuación de Fuller se obtienen mezclas de fácil compactación, estas tienden a ser muy frágiles y a poseer pocos vacíos en el agregado. Es por esta razón que se utilizan las cartas elevadas a 0.45. Una curva de máxima densidad (en el sistema SUPERPAVE), también puede ser dibujada por medio de una línea recta desde el tamaño máximo del agregado (el que pasa el 100% una determinada malla) hasta el origen.

**Gráfica 6. Carta de graduación granulométrica Superpave**



Fuente: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, 2007

Para el uso de una granulometría en SUPERPAVE, esta debe pasar entre los puntos de control y evitar pasar a través de la zona restringida. Esta zona es usada para evitar mezclas que tienen una alta proporción de arena fina respecto a

la totalidad de arena y graduaciones que sigan la línea fina de 0.45, lo cual no proporciona adecuados vacíos en el agregado mineral (VMA).

SHRP recomienda que la granulometría de los agregados pase abajo de la zona restringida. En muchos casos la zona restringida evitará el uso de arena natural en una mezcla y alentará el uso de arena limpia fabricada.

El diseño de la estructura de los agregados asegurará que este desarrolle un resistente "esqueleto de piedra" que mejorará la resistencia a la deformación permanente (rutting) y alcanzará suficientes vacíos para la durabilidad de la mezcla.

- La masa de la muestra del agregado grueso debe cumplir con lo siguiente:

**Tabla 4. Masa del agregado**

| Tamaño máximo nominal<br>abertura en mm. | Masa mínima para la<br>prueba en Kg (Lb) |
|--|--|
| 0,375                                    | 1(2)                                     |
| 0,5                                      | 2(4)                                     |
| 0,75                                     | 5(11)                                    |
| 1  | 10(22)                                   |
| 5,5                                      | 15(33)                                   |

Fuente: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, 2007

Para una determinación más exacta del contenido de finos en una muestra se debe seguir el procedimiento por lavado (AASHTO T11)

- El tamaño mínimo de la muestra de agregado, después del secado, debe cumplir lo siguiente:

100 gramos de agregados con al menos 95% que pasa la malla de 2.36mm (Nº 8)

500g del 5% retenido en la malla 2.36mm (Nº 8) de agregados con al menos 85% que pasa la malla de 4.75mm y mas.

**4.2.2. Fabricación de Probetas.** Las diferencias en los métodos de dosificación de mezclas asfálticas no se deben únicamente al método de evaluación utilizado, sino que también influye el método de compactación empleado en la fabricación de probetas en laboratorio. El objetivo principal de la fabricación y compactación de probetas experimentales, es duplicar razonablemente las condiciones del material in situ, incluidas composición, densidad, y propiedades mecánicas.

**a. Temperatura (AASHTO T166)**

**Figura 15. Viscosímetro Rotacional**



Fuente: [www.pacsa.com.mx/images/f-viscocimetrerot-m.jpg](http://www.pacsa.com.mx/images/f-viscocimetrerot-m.jpg)

La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 15) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio. Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas.

Al realizar un diseño, el grado de comportamiento de los asfaltos (PG) se selecciona considerando la región geográfica y las temperaturas a las cuales estará sometido el pavimento (a partir de registros históricos de temperaturas del aire) deben ser utilizadas bases de datos de estaciones climáticas, con registros de temperatura ambiente por más de 20 años (como mínimo). Para cada año deben ser determinados:

- El promedio de las temperaturas máximas de los 7 días consecutivos más calurosos del año
- La temperatura mínima del día más frío del año

**Tabla 5. Temperaturas según el grado de comportamiento (PG)**

|    | Temperatura maxima | Temperatura minima   |
|----|--------------------|----------------------|
| PG | 52                 | 10,16,22,28,34,40,46 |
| PG | 58                 | 16,28,34,40          |
| PG | 64                 | 10,16,22,28,34,40,46 |
| PG | 70                 | 10,16,22,28,34,40,46 |
| PG | 76                 | 10,16,22,28,34       |
| PG | 82                 | 10,16,22,28,34       |

Fuente: Bitumix CVV

Para ambas series de datos (los cuales son considerados como  $XX_{\text{aire}}$  e  $YY_{\text{aire}}$ ) deben ser determinados su promedio y la desviación estándar.

- **Temperaturas del Aire ( $T_{XX_{\text{aire}}}$  y  $T_{YY_{\text{aire}}}$ ).** La temperatura máxima y mínima del aire que debe ser considerada en el diseño, dependerá de la confiabilidad requerida ( $z$ ) y de la desviación estándar de los datos ( $\sigma$ ). Es decir:

$$T_{XX_{\text{aire}}} = T_{\text{promedio}} + z * \sigma \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

$$T_{YY_{\text{aire}}} = T_{\text{promedio}} - z * \sigma \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Una confiabilidad de 50% considera un verano e invierno promedios.

Por el contrario, confiabilidades mayores asumen veranos más calurosos e inviernos más fríos.

- **Temperaturas del Pavimento ( $T_{XX}$  y  $T_{YY}$ ).** Se calculan a partir de las temperaturas del aire y de un coeficiente ( $Lat$ ) dado por la ubicación geográfica de la zona a pavimentar (latitud).

$$T_{XX} = (T_{XX_{\text{aire}}} - 0.00618 * Lat^2 + 0.2289 * Lat + 42.2) * 0.9545 - 17.78 \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

$$T_{YY} = T_{YY_{\text{aire}}} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Superpave también establece un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, especificando un valor de viscosidad a la temperatura de 135 oC; este valor debe ser como máximo de 3 Pa\*s. En la elaboración de mezcla asfáltica en planta, se deberán tomar las medidas necesarias para lograr temperaturas que permitan un adecuado manejo, fabricación y compactación de la mezcla.

**b. Proceso de Mezclado (AASHTO T-283).** Las mezclas asfálticas utilizadas para la fabricación de las probetas, son acondicionadas durante 2 horas dentro de un horno a la temperatura de compactación (las temperaturas de mezclado y compactación se determinan igual que en el método de diseño tradicional, en función de la viscosidad del asfalto).

Ello permite simular el envejecimiento de “corto plazo” que se produce durante el almacenamiento y transporte de la mezcla asfáltica, dando tiempo además al agregado para absorber el asfalto.

La adhesión entre el asfalto y el agregado debe ser evaluada desde el inicio de un diseño de mezcla y/o tratamiento superficial por la importancia que implica, la cual se reflejará en la vida de un pavimento asfáltico que, alcanzando una mejor afinidad, permita una mejor estabilidad y durabilidad.

Actualmente este factor importante que definirá la vida del pavimento se evalúa con métodos cuyos resultados se dan en forma subjetiva por lo que son insuficientes para tan determinante variable. El ensayo ASTM D-1664 es incierto porque, si se observan desprendimientos, no se puede saber si se deben a la acción del agua o a la poca afinidad árido-ligante. Así mismo el ensayo Riedel Weber no considera las condiciones reales de obra. También, como se sabe, estos ensayos se realizan por separado y no compatibilizan, no pudiendo evaluarse el comportamiento real de la mezcla en conjunto.

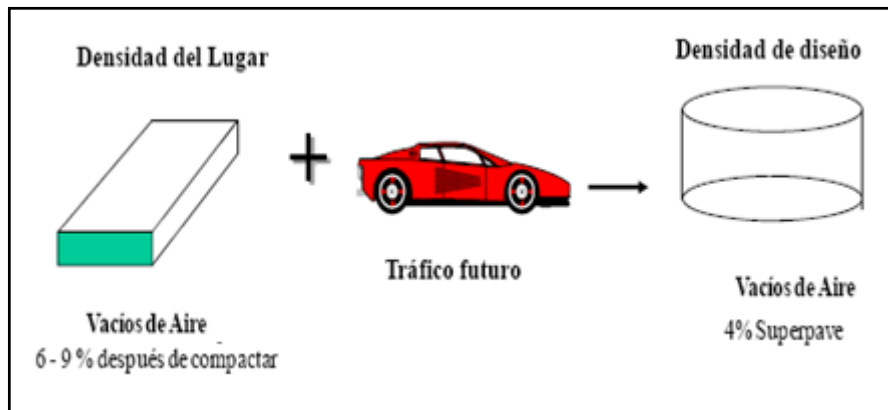
Existe un ensayo moderno que se ajusta más a las condiciones del diseño Superpave cuantificando la adhesividad. Este ensayo es el AASHTO T-283 (ASTM D-4123), conocido también como "Lottman", el cual permite determinar la resistencia a la tracción de los especímenes, midiendo la pérdida de cohesión de una mezcla compactada como resultado de los efectos de saturación acelerada en

agua. Este ensayo mide el comportamiento de la mezcla en conjunto (árido fino, árido grueso y ligante).

También permite predecir la susceptibilidad de desprendimiento de las mezclas asfálticas y evaluar el efecto de los complementos de adherencia que se agregan al cemento asfáltico sí es líquido, y al agregado mineral sí es en polvo. Este proceso nos permite mayor confiabilidad para establecer la adhesividad en las mezclas asfálticas, ya que ensaya el material tal como se va usar en obra.

**c. Compactación.** El principio fundamental de la compactación giratoria se muestra en la siguiente figura:

**Figura 16. Principio fundamental de compactación**



Fuente: Zapata, F. 2000

Los niveles de compactación se dividen en tres  $N_{ini}$  (número inicial de giros),  $N_{des}$  (número de giros de diseño),  $N_{max}$  (número máximo de giros). Los cuales son explicados de forma detallada para una mejor comprensión de los mismos.

$N_{ini}$  es un indicador del comportamiento del agregado y de las propiedades del ligante. Tomando en cuenta que una rápida consolidación a un bajo número de giros es un indicador de que se trata de una mezcla inestable.

$N_{des}$  es la densidad de diseño (compactación de rodillo + tráfico) determinada por el número de ESAL los cuales van de 50-125.

$N_{max}$  es considerado un factor de seguridad el cual es utilizado para garantizar que la mezcla no tenga una densificación que produzca un deterioro en el pavimento tomando en cuenta que el  $N_{max}$  varía de 75 a 205 (al menos  $2 \times N_{des}$ ). El compactador giratorio para Superpave (figura 17) es el resultado de la modificación del compactador giratorio de Texas, adecuado para aplicar los principios de compactación del compactador giratorio francés. Los investigadores de SHRP modificaron el dispositivo de Texas, que cumplía con los objetivos de densificación realista de los especímenes, reduciendo el ángulo y velocidad de giro y adicionando un registro en tiempo real de la altura. En este proceso, una probeta cilíndrica es sometida a presión constante mientras gira con un ángulo y velocidad determinada, alrededor de un eje vertical, tomando registros de densidad a partir de la altura y correlacionándola con el número de giros.

**Figura 17. Compactador giratorio Superpave**



Fuente: [www.ceinatai.com/images/img\\_troxler/t\\_4140.jpg](http://www.ceinatai.com/images/img_troxler/t_4140.jpg)

El uso y especificación del SGC están establecidas en la designación AASHTO TP4-93, "Standard Method for Preparing and Determining the Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the SHRP Gyratory Compactor". La especificación AASHTO MP2-95 "Standard Specification for SUPERPAVE Volumetric Mix Design", establece los requisitos de diseño para las mezclas asfálticas en caliente.

El sistema Superpave del programa SHRP requiere la medición de la altura del espécimen para cada giro, durante el ciclo de densificación, como información básica para el diseño de mezcla asfáltica. Esta información no es generada por los sistemas de compactación Marshall ni por otros tipos de equipos para la compactación en el laboratorio. La medición de la altura de espécimen es realizada automáticamente durante el proceso de densificación con el compactador giratorio Superpave a través de un software que indica, la altura del espécimen y el número de revoluciones, permitiendo de esta manera la determinación de la densidad del espécimen durante su proceso de compactación,

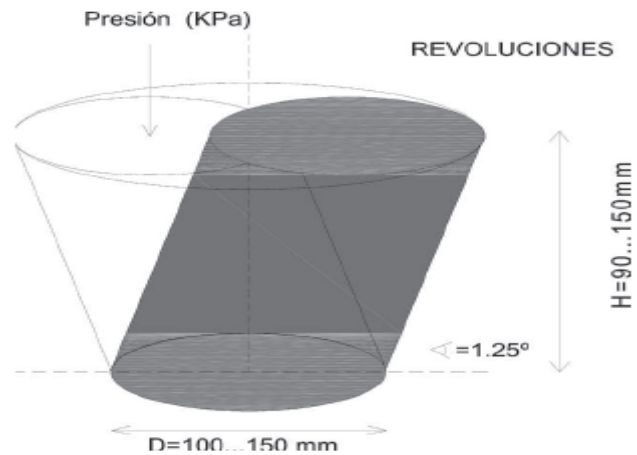
el número de rotaciones a la que esta sujeto la mezcla para la fabricación del espécimen es establecido en las normas antes mencionadas. El equipo de compactación posee incorporado un software.

El SGC utiliza moldes de 6 pulgadas de diámetro, una presión de confinamiento de 600 KPa y un ángulo de inclinación de 1.25 grados para la rotación que compactará los especímenes de laboratorio.

- **Procedimiento de compactación (AASHTO T312).** Lo primero que se debe hacer es precalentar el molde y las pérdida de muestra por aproximadamente 2 horas a una temperatura igual a la temperatura de consolidación de campaña, que es definida como la temperatura a la cual la carpeta tiene una viscosidad cinemática de 0.28 Pa.s luego configure el compactador para realizar una serie de giros (Ndes), que dependen del nivel previsto de tráfico (esal's). Para efectos de mayor precisión se recomienda que el modelo este compactado a 100 giros, lo que corresponde a  $3 - 30 \cdot 10^6$  EASLs .

Posteriormente deje la muestra fresca a 60 ° C antes de la extracción para asegurar que no se deshaga. Asegúrese de quitar los papeles de protección, registre la altura final de la muestra y pese la muestra por la escala. Y por ultimo use la altura de la muestra y el peso registrado para estimar el Gmb del volumen. Los valores de salida no son exactos y tienen que ser corregidos con Gmb modelado en las pruebas siguientes. La salida final es el argumento de %Gmm real corregido contra el número de giros.

**Figura 18. Funcionamiento compactador giratorio**



Fuente: Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, 2007

A manera de conclusión se puede decir que el aumento significativo del módulo dinámico de la mezcla Superpave se asocia a dos situaciones que son: el envejecimiento de la mezcla antes de la compactación y la estructuración del esqueleto del agregado dado por la compactación giratoria que queda en evidencia cuando se comparan los % de VAM alcanzados por la mezcla; obteniendo un valor más bajo ara el método Superpave.

Se debe destacar que el método de diseño Superpave busca obtener mezclas poco o nada susceptibles al ahuellamiento; esta pretensión conlleva a mezclas con esqueletos minerales con elevado ángulo de fricción interna, situación que se refleja plenamente en le resultado de los módulos dinámicos

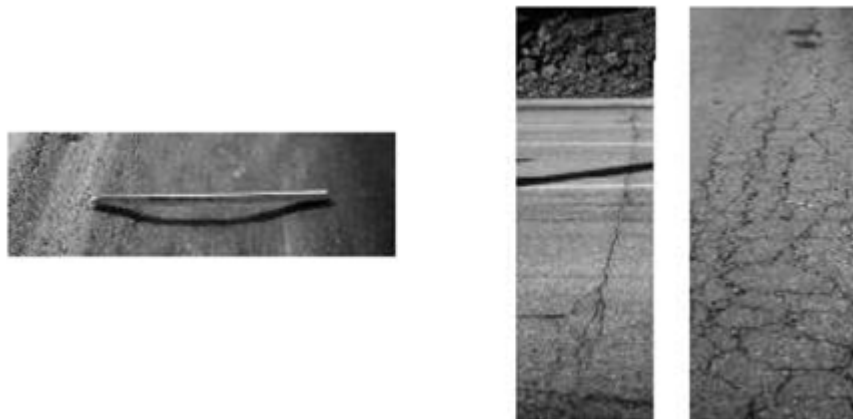
**4.2.3. Selección del Contenido de Ligante.** Los ensayos de ligantes Superpave son directamente relacionadas con el comportamiento en el campo. El ligante es ensayado para tres condiciones: durante la preparación: transporte, almacenamiento y manipulación; con Envejecimiento “corto” luego de la

producción y con Envejecimiento “largo” durante su vida de servicio. El envejecimiento es la pérdida de las propiedades del asfalto por oxidación de sus componentes más sensibles.

También se considera el rango completo de temperaturas que experimentará el pavimento en el lugar del proyecto, sobre todo las temperaturas extremas en servicio.

Los ensayos del ligante se han desarrollado con la finalidad de controlar los tres tipos de fallas típicas que sufren las carpetas asfálticas: deformación permanente (“rutting”), agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico (Figura 19).

**Figura 19. Deformación permanente, agrietamiento por fatiga y agrietamiento térmico**



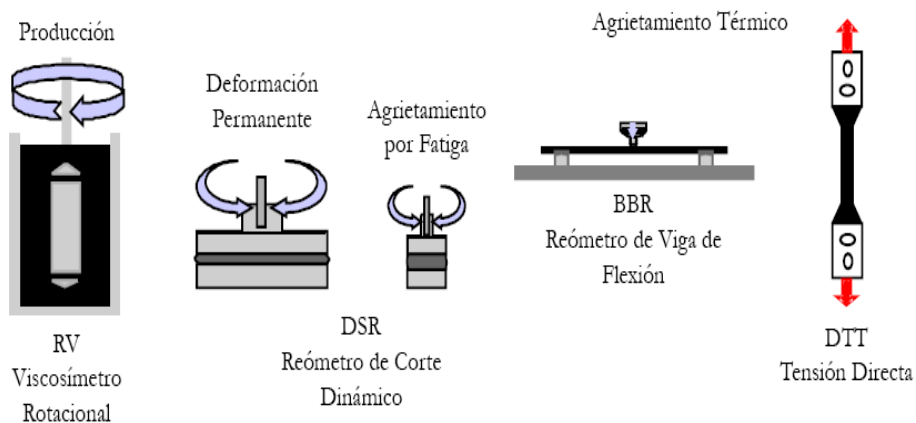
Fuente: [www.asfaltogravayterracerias.com.mx/Portals/0/imagenes/grietas10.jpg](http://www.asfaltogravayterracerias.com.mx/Portals/0/imagenes/grietas10.jpg)

El Superpave considera 04 grupos de ensayos para evaluar el comportamiento del ligante (Figura 20): El Viscosímetro Rotacional o de Brookfield evalúa la viscosidad del ligante temperaturas similares a las comúnmente usadas durante la

construcción (135°C). El Reómetro de Corte Dinámico, DSR que determina el comportamiento elástico-viscoso del ligante a través del Módulo de Corte Complejo,  $G^*$  y el ángulo de fase  $\delta$  para temperaturas intermedias y máximas del ligante.

El ensayo DSR evalúa la capacidad del ligante para resistir deformaciones permanentes. Para controlar el agrietamiento por fatiga el ensayo se realiza en el ligante con envejecimiento corto, y largo, a la temperatura promedio. El reómetro de viga a flexión, el cual evalúa la rigidez a bajas temperaturas bajo el efecto de una carga en el centro de una viga incluyendo parámetros como rigidez a la fluencia y pendientes durante un determinado lapso de tiempo. El ensayo de tracción directa, este evalúa la elongación a bajas temperaturas calculando deformaciones y esfuerzos de falla bajo la aplicación de ciertas cargas.

**Figura 20. Ensayos Superpave**



Fuente: Instituto Chileno del Asfalto

Para la primera etapa de ensayo dos nuevas normas han sido aprobadas recientemente por el Comité D04 de ASTM International sobre Materiales para

calles y pavimentos. Las normas, son la D 6931, Método de prueba para resistencia indirecta a la tracción (IDT por sus siglas en inglés) de mezclas bituminosas, y la D 7312, Método de prueba para determinar el esfuerzo de corte permanente y el módulo de corte complejo de las mezclas de asfalto utilizando el dispositivo para pruebas de corte Superpave (SST por sus siglas en inglés). De las cuales nos enfocaremos en la segunda ya que es la que nos compete en este caso.

El método de prueba ASTM D 7312 fue desarrollado por el D04.26 para brindar procedimientos de prueba relacionados con el desempeño para determinar el módulo rigidez y el esfuerzo de corte permanente de las mezclas asfálticas utilizando el dispositivo de pruebas de corte Superpave.

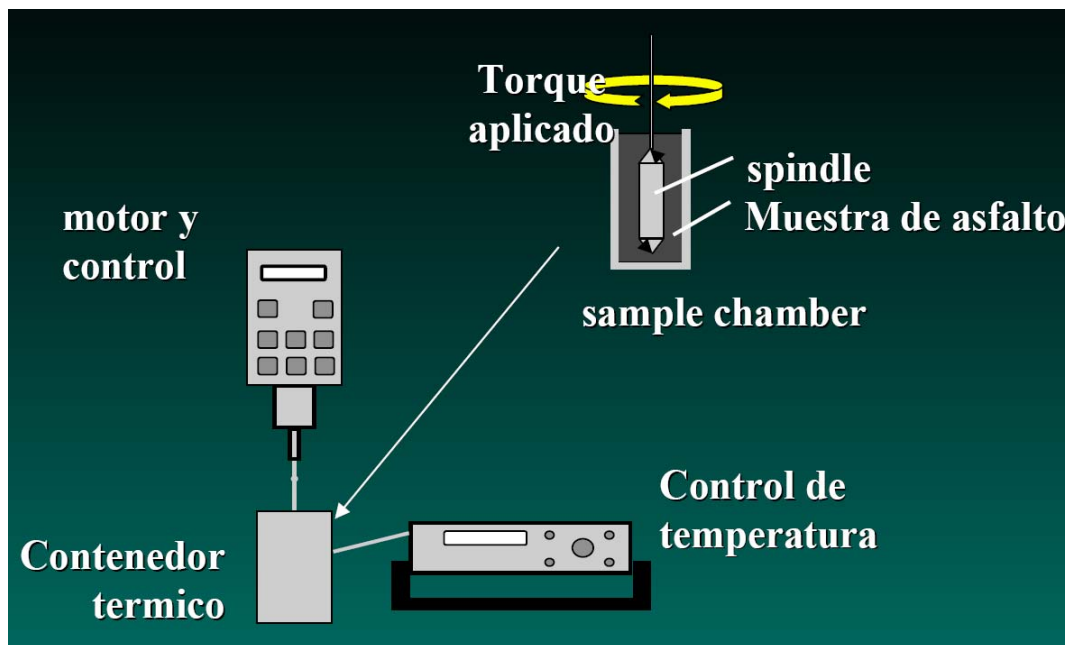
Las pruebas descritas en el D 7312 pueden utilizarse para evaluar los cambios en las mezclas de asfalto mezclado en caliente y para clasificar las diferentes mezclas según su resistencia a la deformación permanente y, en cierto grado, a la fisura por fatiga. Otras aplicaciones de investigación incluyen la evaluación de los efectos de utilizar pavimento asfáltico reciclado en nuevas mezclas y el estudio de los efectos de cambio de aglutinantes, agregados y aditivos.

En varios países que actualmente diseñan y construyen sus pavimentos usando Superpave han encontrado que, en general, la resistencia al ahuellamiento de las mezclas tiende a ser adecuada. Esto debe ser esperado ya que debido a los requisitos volumétricos y propiedades de los materiales, las mezclas Superpave tienden a tener un fuerte esqueleto granulométrico. Adicionalmente, al usar ensayos de ahuellamiento en laboratorio para aceptar las mezclas, la resistencia a la deformación permanente es aún mejorada.

a. **Viscosímetro rotacional (RV) ASTM D 4402.** La prueba del viscosímetro rotacional (Figura 21) se utiliza para determinar las temperaturas de mezclado y compactación de la mezcla asfáltica en el laboratorio.

Se determinan las viscosidades a distintas temperaturas, y se construye una carta de viscosidad en donde se seleccionan las temperaturas de mezclado y compactación correspondientes a los rangos de viscosidades de  $0.17 \pm 0.02$  y  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s respectivamente.

**Figura 21. Esquema ensayo de viscosímetro rotacional**



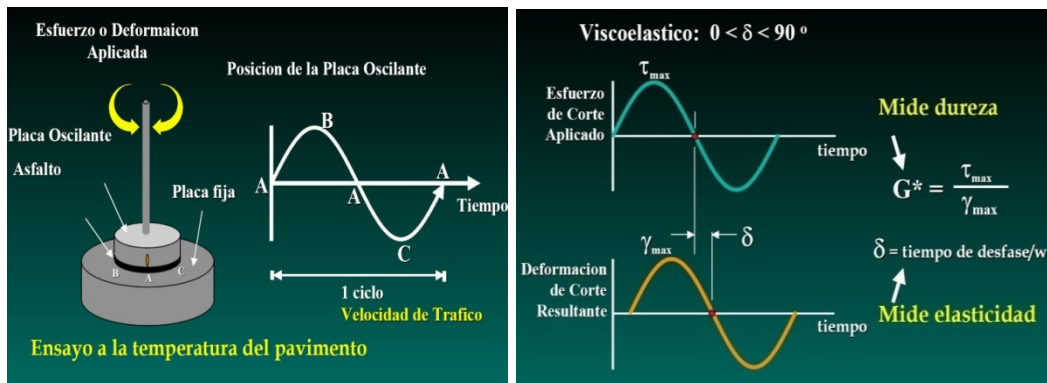
Fuente: Instituto Chileno del Asfalto

Superpave también establece un criterio para asegurar el fácil manejo y bombeo del asfalto en planta, especificando un valor de viscosidad a la temperatura de  $135^{\circ}\text{C}$ ; este valor debe ser como máximo de  $3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Se puede ver en la Figura 3.3 que el cemento asfáltico AC-20 sin modificar cumple con el requerimiento, no así

el modificado con 3% de SBS. Dado lo anterior, si se pretende utilizar el ligante modificado en estudio, en la elaboración de mezcla asfáltica en planta, se deberán tomar las medidas necesarias para lograr temperaturas que permitan un adecuado manejo, fabricación y compactación de la mezcla.

**b. Reómetro de corte dinámico (DSR) AASHTO TP 5-98.** La prueba se realiza a los asfaltos en su estado original y envejecido en el horno RTFO. La Figura 22 muestra la variación del valor  $G^*/\text{sen } \delta$  para las diferentes temperaturas a las que se ejecutó el ensaye. Se puede ver que el valor de  $G^*/\text{sen } \delta$  disminuye notablemente a medida de que aumenta la temperatura de prueba. Se observa también que tanto para el cemento asfáltico modificado y sin modificar, los valores de  $G^*/\text{sen } \delta$  son más altos para el asfalto envejecido; esto es debido al endurecimiento que sufre el ligante como consecuencia de la volatilización de aceites durante la prueba en el horno RTFO.

**Figura 22. Esquema ensayo reómetro de corte dinámico**



En la Figura 22 se puede ver que la diferencia entre los grados de desempeño entre el cemento asfáltico AC-20 sin modificar (PG-64), y el modificado con 3% de SBS (PG-88) es bastante amplia, dado los mayores valores de  $G^*/\text{sen } \delta$  que se

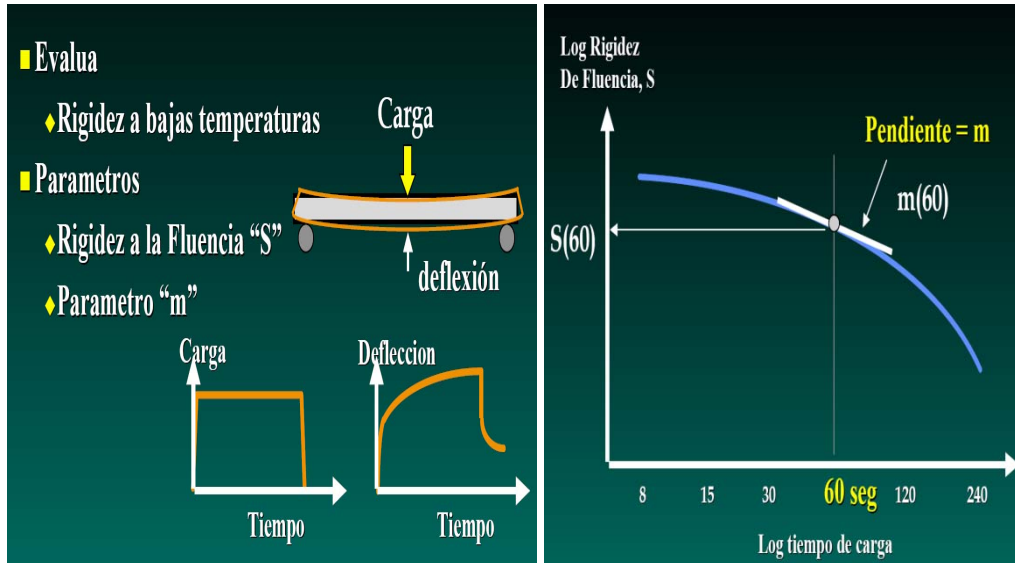
presentan para este último tipo de ligante, lo que indica que el asfalto modificado presenta una rigidez muy superior a altas temperaturas, que el cemento asfáltico sin modificar.

Los ensayos que se realizan en cumplimiento con las nuevas especificaciones SHRP contenidas en el Superpave se basan en medir propiedades fundamentales de los asfaltos, esto es aquellas que pueden relacionar tensiones deformaciones en el material. Los módulos complejo y Stiffness del asfalto son medidos (no estimados) a las temperaturas de ensayo. Asimismo la deformación a baja temperatura y la viscosidad rotacional a alta temperatura son parte del conjunto de ensayos utilizados.

Con la información de viscosidad rotacional, módulo complejo, módulo stiffness y deformación a la rotura medidas a temperaturas críticas de servicio se tiene un espectro de características del ligante que permiten confiar en ensayos realizados bajo condiciones que simulan tres etapas críticas por las que pasa el asfalto en servicio, deformaciones permanentes, fatiga y fisuración térmica.

- **Reómetro de viga a flexión (BBR) AASHTO TP1-98.** El reómetro de flexión de viga (*Bending Beam Rheometer*) es un equipo específicamente diseñado para la determinación de las propiedades de fluencia a baja temperatura de los ligantes bituminosos. Es un equipo neumático, totalmente controlado por ordenador, que consta de un baño termostático refrigerado, un puente de ensayo con célula de carga y extensómetro, un panel de control de presiones, una unidad externa de refrigeración, un kit de calibrado y verificación del equipo, programas para el control y tratamiento de los datos obtenidos así como de diversos accesorios para la preparación de probetas.

Figura 23. Esquema ensayo reómetro de viga a flexión



Fuente: Instituto Chileno del Asfalto

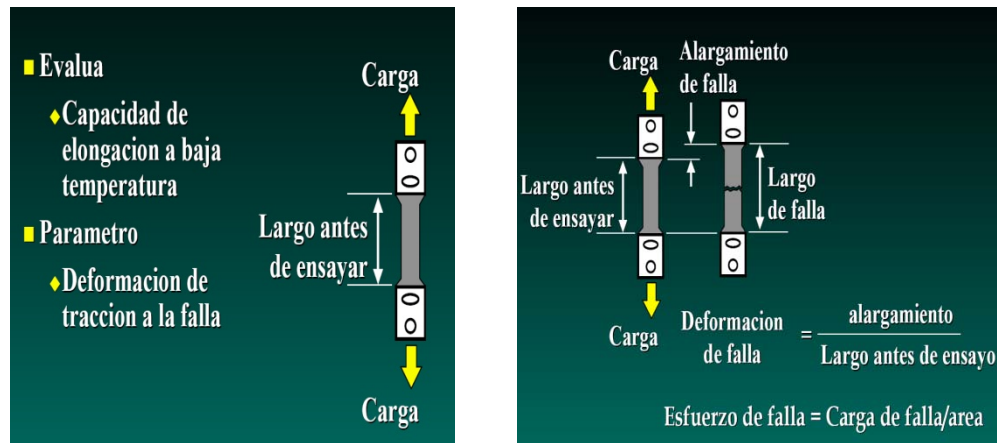
### Características técnicas

- Rango de temperatura: -40 a 25 °C ( $\pm 0,1$  °C)
- Célula de carga: 1000 g de capacidad en compresión ( $\pm 0,0155$  g)
- Transductor de deformación: LVDT de  $\pm 5,08$  mm de recorrido ( $\pm 0,15$  mm)
- Rango de medida: 10 a 1000 MPa

La principal aplicación del equipo es la comprobación y la determinación del grado de los betunes asfálticos dentro de las especificaciones recogidas en la normativa SHRP y de acuerdo con la norma AASHTO TP1-93. El aparato aplica durante 4 minutos una carga constante en el centro de una pequeña viga del betún previamente envejecido y enfriado a la temperatura de ensayo (entre -36 y 0 °C), la deformación producida se mide continuamente calculando la resistencia del ligante a la acción de la carga y su velocidad de variación. Los valores obtenidos se relacionan con la resistencia a la fisuración térmica de las mezclas bituminosas.

c. **El ensayo de tracción directa (DDT) AASHTO TP3-00.** Existen ensayos que representan cada uno de los estados límites, pero no hay ninguno que represente los cuatro a la vez. Así mismo, tampoco es necesario representar los cuatro debido a que la experiencia determina que la zona más crítica de tensiones se produce en la fibra inferior de la capa bituminosa bajo la carga aplicada.

**Figura 24. Esquema ensayo de tracción directa**



Fuente: Instituto Chileno del Asfalto

Aunque el comportamiento de las mezclas bituminosas es no lineal y depende del tiempo, generalmente se acepta que un análisis multicapas elástico-lineal proporcione datos razonables de la respuesta del firme a temperaturas inferiores a los 25°C (Roque, Buttlar).

Este ensayo reproduce el estado de tensiones en las fibras inferiores de la capa asfáltica o zona de tracción. Es un método práctico y sencillo para caracterizar las propiedades de las mezclas bituminosas o evaluar el fallo provocado por tensiones de tracción.

El parámetro a medir es la carga de rotura de la probeta, también se puede determinar el desplazamiento vertical y la deformación horizontal del diámetro de la probeta

En el método Superpave, el ensayo de tracción indirecta sirve para evaluar el comportamiento de las mezclas en temperaturas frías; y para evaluar la resistencia de las mismas a la tracción por rotura térmica (y fatiga térmica, si es el caso). Sin embargo, en la tecnología tradicional de las mezclas asfálticas, se aprecia mucho este ensayo para evaluar la resistencia a la humedad que puedan tener las mezclas asfálticas; y se determina también que esta propiedad de las mezclas cambia cuando cambian parámetros como contenido de asfalto, compactación y trabazón de áridos.

Por lo anotado, se usa como ensayo para control de calidad de la mezcla compactada, porque un núcleo (o corazón) tomado del pavimento ya construido, debe dar resultados de resistencia a la tracción indirecta que sean parecidos a los de briquetas que se tomaron en laboratorio y se ensayaron a valores de vacíos similares a los que se espera en el campo.

- **Determinación del contenido de asfalto.** La práctica actual del diseño volumétrico de mezclas asfálticas, recomienda como primer criterio de selección elegir aquel contenido de asfalto correspondiente al 4 % de vacíos de aire ( $V_a$ ), y verificar después que los parámetros volumétricos restantes se encuentren dentro de los rangos establecidos por el método.

### 4.3 LPC

Este método, desarrollado en Francia y fundamentado en las normas existentes en ese país y en las europeas para la formulación de mezclas asfálticas. Los principios de este método son dos:

- **Encontrar un material para cada necesidad.** Esto significa que los materiales que conforman la mezcla asfáltica deben satisfacer ciertas necesidades dependiendo de su ubicación dentro de la estructura.

- **Un ensayo para cada propiedad.** Este método sugiere realizar un ensayo diferente para medir cada una de las propiedades que debe cumplir la mezcla asfáltica. Se debe aclarar que aunque se desee resaltar una propiedad específica, las mezclas igualmente debe cumplir con los requisitos para cada propiedad.

El LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), con el propósito de reunir y consignar los conocimientos de la Red Científica y Técnica de l'équipement (RST) en materia de formulación de hormigones asfálticos en caliente, ha desarrollado un manual que sirva como base para la redacción de un método francés de formulación de materiales viales en el que se describen todos los aspectos a tener en cuenta al momento de hacer la formulación de una mezcla asfáltica.

**4.3.1. Selección de los Componentes.** Los hormigones asfálticos bituminosos están constituidos por una mezcla granular de la que el tamaño varía entre 0 y D (mm) y un ligante hidrocarbonada. Pueden añadirse aditivos a esta mezcla para mejorar sus propiedades. La mezcla final compactada y enfriada posee un contenido de vacíos que influye en el rendimiento del producto.

**a. Agregados minerales.** La granulometría no corresponde a una banda granulométrica definida, sino a un valor prefijado por lo que los agregados deben ser separados en fracciones preestablecidas: 0/2, 2/6, 6/10, 10/14.

- **Finos.** Las normas para materiales de hidrocarburos requieren un tamizado en seco a través de un tamiz de 0,125 mm, las pruebas del índice de vacíos Rigden, la determinación de  $\Delta TBA$ , y MBF valor azul de metileno.

Los agregados finos de aportación no siempre son escogidos definitivamente en el momento del estudio de formulación. En ciertas regiones, el origen de los agregados finos de aportación es único.

El polvo mineral calcáreo es utilizado mayoritariamente como polvo mineral de aportación, sin embargo otro tipo de material puede ser sustituirlo o complementar para mejorar alguna propiedad específica. Así pues, el cemento puede ser utilizado para sustituir el polvo mineral calcáreo pero es conveniente limitar su dosificación al 3 o 4 %. Más allá, la hidratación del cemento en la mezcla puede influir en problemas de fisura.

La cal viva es introducida en la mezcla para evitar la aparición del fenómeno de "sopa", observado en el momento del amasado, con agua retenida por algunos agregados porosos. Puede ser interesante utilizarlo para mejorar la postura al agua. Es necesario limitar su dosificación al 1 % (riesgo de inflamamiento) y tomar las precauciones necesarias frente de su inhalación.

El polvo mineral acelerado es una mezcla calcárea de agregados finos y de cal apagada utilizada de la misma manera que la cal viva.

La combinación del asfalto y del polvo mineral en el seno de una mezcla hidrocarbonada, constituye un mástico cuyas propiedades van a acondicionar una

parte de las características de la mezcla. Sus propiedades son esencialmente evaluadas con la ayuda del  $\Delta TBA$ . Valores elevados de  $\Delta TBA$  son un factor favorable para la resistencia a la deformación permanente. Valores excesivos de  $\Delta TBA$  pueden conducir a un riesgo de fisura.

Valores elevados de índice de vacío Rigden generalmente implican un aumento del módulo de riqueza para obtener un volumen de asfalto libre equivalente al obtenido en un material corriente.

- **Arenas.** Los criterios relativos a las arenas que influyen en los materiales bituminosos son los siguientes:

Se debe prestar especial atención a mezclas con pocos agregados finos que afecten su compactación.

- **Angularidad.** La Angularidad de las arenas acondiciona en gran parte la resistencia a la deformación permanente del hormigón asfáltico.

Las características de la cadena de elaboración de las arenas que proviene de roca maciza pueden en efecto tener una influencia muy grande sobre las características del hormigón asfáltico. Los agregados pueden presentar espinas embotadas debidas los tratamientos de reciclaje, trituración etc. Su frotamiento interno entonces es considerablemente disminuido y puede alterar la estabilidad de la mezcla. Este problema puede ser puesto en evidencia a prueba por derrame de arena. Cuando el porcentaje de vacíos de una mezcla es demasiado importante, la incorporación de una proporción débil de arena poco angulosa permite reducirlo, para hormigones asfálticos poco expuestos a los riesgos de deformación permanente su dosificación es limitada al 10 % para los hormigones bituminosos. No hay que sobrepasar el 20 % para las capas fundación. El efecto de una débil angularidad puede ser compensado a veces por la utilización de una

ligante de grado "duro" en el caso de una utilización del hormigón asfáltico en capa de base o de fundación. Sin embargo es sabio en privilegiar en todos los casos la estabilidad del esqueleto granular.

- **Dureza.** Cuando exista una diferencia intrínseca entre las diferentes fracciones de un granulado recubierto, puede producirse un desgaste total del material más tierno. Encontramos por ejemplo corrientemente una arena tierna con gravillas duras. Algunos limitan a una clase la diferencia. Lo inverso (arena dura y gravillas tiernas) no son aceptables en capas de rodadura. Si la arena tiene un origen diferente del de las gravillas, es necesario efectuar una prueba (ensayo) de friabilidad de la arena.

- **Gravillas.** Dentro de los criterios a tener en cuenta en cuanto a este tipo de material están:

- **Naturaleza de la roca.** Materiales frotantes: Se les llama frotantes cuando los porcentajes de vacíos comprobados sobre las probetas de la prueba son próximos a valores observados en campo, mientras que la prueba de Prensa a Cizalladura Giratoria pone en evidencia un defecto de manejabilidad (exceso de vacíos del orden de 4 al 5 %) para el número especificado de giros.

- **Materiales manejables:** materiales que a pesar de su angularidad, una curva granulométrica clásica para el material considerado, conduce a porcentajes débiles de vacíos.

- **Materiales porosos:** estos materiales absorben por su porosidad una parte del asfalto y ocasionan problemas en su manejabilidad. Este fenómeno es observado con los basaltos, los lecheros, las calizas dolomíticas.

- **Materiales evolutivos:** estos materiales presentan una evolución de sus características en el tiempo. Es el caso de los Lecheros y las escorias.

- **Forma.** Agregados demasiado cúbico pueden conducir a manejabilidades excesivas. El coeficiente de aplanamiento FI debe preferentemente ser comprendido entre 10 y 15.

- a. **Angularidad.** Acondiciona la estabilidad de la mezcla e interviene en las características de superficie.

- b. **Ligantes.** El origen del ligante no siempre es conocido en el momento de la formulación. Para realizar el ensayo de Prensa de Cizalladura Giratoria, el origen del asfalto que no tiene efecto sobre el resultado, es posible utilizar un asfalto del mismo grado que el usado en obra. Para caracterizar una mezcla a partir de los ensayos Duriez, de deformación permanente, de determinación de módulo o de resistencia a la fatiga, el origen del asfalto influye en el resultado del ensayo.

- **Naturaleza del asfalto.** La elección de asfalto debe contribuir a alcanzar el rendimiento necesario para el producto. Algunas de estas actuaciones forman parte de la formulación de ensayos sobre la mezcla de hidrocarburos (apreciada al agua, la resistencia a la deformación, el módulo, la resistencia a la fatiga), pero otros directamente no se expresan por medio de los resultados de ensayos (envejecimiento, oxidación, fisura "por la altura"). Especificaciones empíricas a partir de los ensayos tradicionales pueden entonces ser utilizadas.

- **Ligantes puros.** Para prevenirse riesgos de fisura en condiciones severas por solicitaciones de tráfico y de clima, se debe elegir el grado más "suave" de conformidad con los requisitos de resistencia a las deformaciones.

- **Ligantes a susceptibilidad mejorada.** Son asfaltos puros de fabricación especial, cuya penetración a 25 °C corresponde a la de un grado normalizado (35/50 o 50/70 por ejemplo), pero cuya temperatura de bola - anillo es generalmente superior al límite normalizado para el grado correspondiente. La temperatura FRAASS es también más baja que la de ligantes puros de grado equivalente ( $\leq -15$  °C). Son utilizados particularmente para mejorar las propiedades anti-desplazamiento de los materiales.
  
- **Ligantes "duros".** Son ligantes puros obtenidos por un procedimiento de refinado directo (NF EN 13924) y cuya penetrabilidad es inferior a 25 1/10 mm. La temperatura bola-anillo generalmente varía entre 62 °C y 72 °C. La temperatura FRAASS es aproximadamente de 0 °C (+ 3 °C a - 8 °C). La temperatura de envoltura es superior a aproximadamente 20 °C con relación a la de ligantes convencionales. La utilización principal de este tipo de ligante concierne al EME. La dureza de este tipo de asfalto puede conducir a una fragilidad a temperatura baja. Es conveniente pues utilizarlos con una protección térmica en el caso de climas rigurosos.
  
- **Ligantes modificados.** Los ligantes modificados son unos ligantes bituminosos cuyas propiedades han sido modificadas por el empleo de un agente químico, que al ser introducido en el asfalto base, modifica la estructura química y las propiedades físicas y mecánicas. En todos los casos, con este tipo de materiales, conviene tener cuidado a los riesgos de inestabilidad, de descreme, de sensibilidad a la historia térmica.
  
- **Ligantes pigmentables.** Estos ligantes, y mezclas asfálticas son más susceptibles a la temperatura que los materiales a base de asfalto "normales". Son reservados para un uso urbano o para usos puntuales.

- **Ligantes sintéticos.** Los ligantes sintéticos presentan numerosas diferencias de comportamiento con relación a los ligantes tradicionales.

Su sensibilidad a la temperatura puede ser muy diferente de la de un asfalto normalizado de grado equivalente.

Su temperatura de envoltura debe ser indicada por el proveedor. Puede variar en un orden de 15 °C con relación a la de un asfalto puro de la misma consistencia.

- **Ligantes bituminosos con cargas minerales.** Estos ligantes se obtienen mediante la mezcla de vegetales, el betún y cargas minerales puras, como la cal. El contenido ligantes es diferente al contenido de bitumen. El objetivo es en general "hacer rígido" la mezcla asfáltica.

- **Ligantes de origen agroquímico.** Son ligantes fabricados a partir de materias vegetales sin material derivado de la petroquímica. El producto es transparente y puede ser coloreado. Su utilización está en curso de evaluación.

**4.3.2. Contenido Mínimo de Ligante.** El contenido de ligante para las mezclas asfálticas según este método está definido en función del módulo de riqueza K, que es una cantidad proporcional al espesor de la laminilla de ligante hidrocarbonada que envuelve el material granular.

El valor de K es independiente de la masa volumétrica de la mezcla granular y está relacionado con el contenido de ligante por la siguiente ecuación:

$$TL = K * \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Donde:

TL: Contenido de ligante

K: Módulo de Riqueza

$\Sigma$ : superficie específica, expresada en metros cuadrados por kilogramo, determinada por la relación:

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 150 f \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

Donde:

- G: porción de elementos superior a 6,3 mm
- S: porción de elementos comprendidos entre 6,3 mm y 0,250 mm
- s: porción de elementos comprendidos entre 0,250 mm y 0,063
- f: porción de los elementos inferiores a 0,063 mm
- $\alpha$ : un coeficiente corrector relativo a la masa volumétrica de los agregados.  $\alpha = 2,65 / \rho_G$  donde  $\rho_G$  es la masa volumétrica de los agregados en gramos por centímetro cúbico.

Este cálculo no se aplica si la mezcla contiene aditivos especiales, tales como fibras.

Para cada tipo de mezcla existe un módulo de riqueza mínimo específico. Sus valores van desde 2.5, para gravas asfálticas clase 1, hasta 3.6, para BBA continuo (betunes bituminosos aerodinámicos).

Los valores mínimos del módulo de riqueza se encuentran en el Manual LPC para la formulación de hormigones asfálticos en caliente (Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud).

#### **4.3.3. Fabricación de la Mezcla**

**a. Medida de masas volumétricas.** La densidad de los agregados se mide utilizando la norma P 18-559 mediante el uso de aceite de parafina, cuya viscosidad es similar a la del betún durante la operación de revestimiento. MVR densidad de la mezcla se calculará con la fórmula:

$$MVR = \frac{100 + TL}{\frac{\%G_1}{\rho_{g1}} + \frac{\%G_2}{\rho_{g2}} + \dots + \frac{\%G_n}{\rho_{gn}} + \frac{TL}{\rho_b}} \quad (\text{Ecuación 4.7})$$

Donde los % Gi son los porcentajes de las fracciones granulares y  $\rho_i$  sus masas volumétricas respectivas.

Este método, permite hacerse para agregados que presentan una porosidad relativa a la absorción de asfalto. Además, refiriéndose a un método único de determinación del MVR, las medidas posteriores de porcentaje de vacíos son comparables más fácilmente. El MVR determinado de esa manera sirve de base al cálculo de los porcentajes de vacíos de las probetas sometidas a los ensayos en el marco de la prueba de formulación, pero también a las medidas in situ, el método descrito en la norma NF EN 12697-5, mide la masa volumétrica efectiva. Este procedimiento presenta la ventaja de ser practicado sobre la mezcla total, lo que reduce el número de ensayos que deben realizarse para el cálculo de la densidad de cada fracción granular.

**b. Proceso de mezclado.** Los agregados deben ser calentados antes de su incorporación a una temperatura de  $\pm 5^\circ\text{C}$ , a través de una tolva con ventilación y se coloca en un horno colocada en estufa a la temperatura de preparación durante  $(2,5 \pm 0,5)$  horas.

La tolva de molino debe ser agitada periódicamente para evitar sobrepresiones. Para el caso de agregados no calentados antes de la mezcla, se calientan a  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ , utilizando un horno ventilado durante  $(2,5 \pm 0,5)$  h.

**4.3.4. Caracterización de las Mezclas.** Los principales ensayos utilizados para la realización de la prueba de formulación están resumidos más adelante.

Los ensayos fueron objeto de experimentos de precisión para determinar la repetitividad  $r$  y la reproductibilidad  $R$ . ( $r/R$ )

**a. Compactabilidad en la Prensa a Cizallamiento Giratorio.** La mezcla hidrocarbonada preparada en laboratorio, es colocada a una temperatura de ensayo ( $130^{\circ}\text{C}$  a  $160^{\circ}\text{C}$  aproximadamente) en un molde cilíndrico de 150 mm o 160 mm de diámetro. Se aplica sobre la parte superior de la probeta una presión, vertical de 0,6 MPa. Al mismo tiempo, la probeta es inclinada un ángulo pequeño del orden de  $1^{\circ}$  (externo) o  $0,82^{\circ}$  (interno) y sometida a un movimiento circular. Estas diferentes acciones ejercen una compactación por amasado. Para un número dado de giros, función del tipo de hormigón asfáltico, de la naturaleza del agregado y del espesor de puesta en ejecución, el formulador puede prever el porcentaje de vacíos en obra. En el caso de capas muy delgadas de rodadura, se trata de acercarse más a la macrotextura que a la compactación.

**Figura 25. Compactador giratorio**

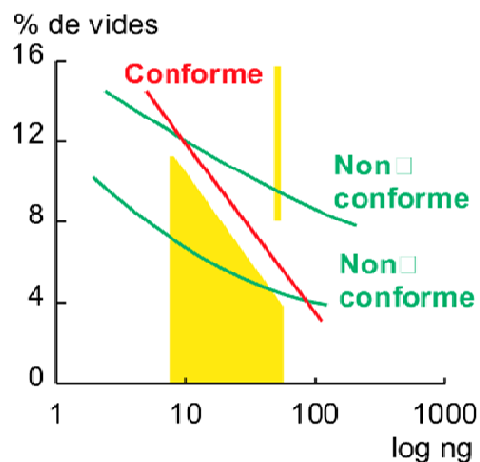


Fuente: Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés

El ensayo es muy sensible a los factores de formulación, como la "fricción" del esqueleto granular (Angularidad), el contenido de ligamento.

A partir de este ensayo, los riesgos de deformación permanente pueden también ser detectados. Así pues, mezclas que se compactan con pocos giros son muy susceptibles a la deformación. Es por esto que para ser consideradas aceptables a este ensayo, las probetas deben cumplir con un mínimo de giros antes de alcanzar la compactación deseada, según la gráfica No 7.

**Gráfica 7. Número de giros vs porcentaje de vacíos**



Fuente: Yves BROSSEAUD, Eduardo Castañeda, 2005

Gracias a la rapidez del ensayo, la Prensa a Cizallamiento Giratoria es un instrumento valioso para el formulador. Este ensayo también permite descubrir los cambios imperceptibles en los ensayos corrientes sobre los agregados y para verificar la constancia de las fórmulas en el tiempo, las especificaciones son aplicadas a todo tipo de hormigones asfálticos.

**b. Sensibilidad al agua.** La sensibilidad al agua es medida por medio del ensayo de Duriez de acuerdo a la normatividad francesa. La normatividad europea tiene un ensayo de compresión diametral, del que se habla más adelante, que es hecho para reemplazar el ensayo Duriez.

**Figura 26. Probeta de ensayo de compresión simple**



Fuente: Yves Brosseaud, Eduardo Castañeda, 2005

En este procedimiento de ensayo, la mezcla hidrocarbonada es comprimida en un molde cilíndrico con una presión estática a efecto doble. Una parte de las probetas es conservada sin inmersión a temperatura ( $18^{\circ}\text{C}$ ) e higrometría controladas, la otra parte es conservada sumergida. Cada grupo de probetas es compactado en compresión simple (figura 26). La comparación de la resistencia después de la inmersión con la resistencia en seco indica la sensibilidad al agua de la mezcla. La resistencia en seco es una aproximación de las características mecánicas, y la compactación constituye un indicador complementario a la prueba de compactación en la Prensa de Cizallamiento Giratoria.

**c. Ensayo de compresión diametral.** Las probetas cilíndricas son compactadas en la Prensa de Cizallamiento Giratoria. Una parte de las probetas es conservada sin inmersión a temperatura ambiente, la otra parte es conservada sumergida después de una desgasificación durante 70 horas a  $40^{\circ}\text{C}$ . Cada grupo de probetas es compactado en compresión diametral (tracción indirecta) a una temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$ . La comparación de la resistencia después de la inmersión con la resistencia en seco indica la sensibilidad al agua de la mezcla.

d. El ensayo de deformación permanente.

**Figura 27. Equipo para medir resistencia al ahuellamiento**



Fuente: Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés

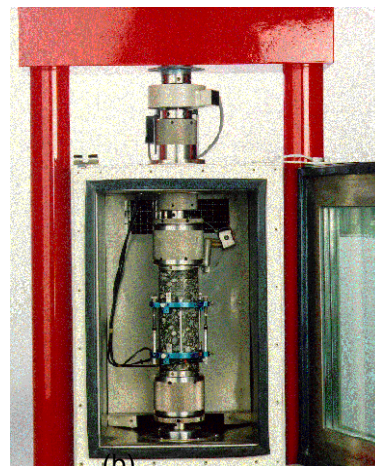
La probeta de prueba es una placa paralelepípeda de 5 o 10 cm de espesor, según si el espesor del hormigón asfáltico a probar es inferior o superior a 5 cm. Esta placa está sometida a la circulación de una rueda equipada de un neumático (frecuencia: 1 Hz, carga: 5 kN, presión: 6 bares), en condiciones severas de temperatura (60 °C). La profundidad de la deformación producida por el paso de la rueda, es anotada con respecto al número de ciclos. Las especificaciones se refieren en un porcentaje de carril a un número dado de ciclos, que depende del tipo de material, y de su clase.

**e. Ensayos de módulo de rigidez.** La rigidez de la mezcla es determinada o por un ensayo de módulo complejo, sobre probeta trapezoidal (Figura 28a) o por un ensayo de tracción directa, sobre probeta cilíndrica o paralelepípeda (Figura 28b). La carga es aplicada en un campo de pequeñas deformaciones, controlando el tiempo o la frecuencia, la temperatura, la ley de carga. El módulo (informe de la limitación a la deformación) es calculado para cada ensayo elemental. Gracias a la

equivalencia el tiempo-temperatura, trazamos la curva principal del módulo a una temperatura dada. Esta representación permite conocer el comportamiento de la mezcla sobre un espectro ancho del tiempo de carga o de las frecuencias.

La especificación se refiere en el módulo a 15 °C y una frecuencia de 10 tipos de Hz o el tiempo de carga de 0,02.

**Figura 28. (a) Ensayo de modulo complejo (b) Ensayo de tracción directa**



Fuente: Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés

**f. La resistencia a la fatiga.** Una probeta trapezoidal está sometida, a una temperatura y para una frecuencia de carga fijadas, a una deformación impuesta. Cuando la limitación aplicada para mantener la deformación constante es disminuida de la mitad, la probeta está considerada como dañada en total de ciclos considerados.

**Figura 29. Ensayo de fatiga**



Fuente: Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés

La resistencia a la fatiga es medida por un coeficiente llamado  $\epsilon_6$ , que representa la deformación a la cual la mezcla es capaz de soportar un millón de cargas, entre más alto sea el valor de  $\epsilon_6$  la mezcla muestra mayor resistencia a la fatiga.

**4.3.5. Selección de la Formula de Trabajo.** Para llegar a la fórmula definitiva, la mezcla debe pasar por la denominada Prueba de Comprobación que consiste en realizar los ensayos mencionados en el numeral anterior y cumplir con los requisitos mínimos de cada uno.

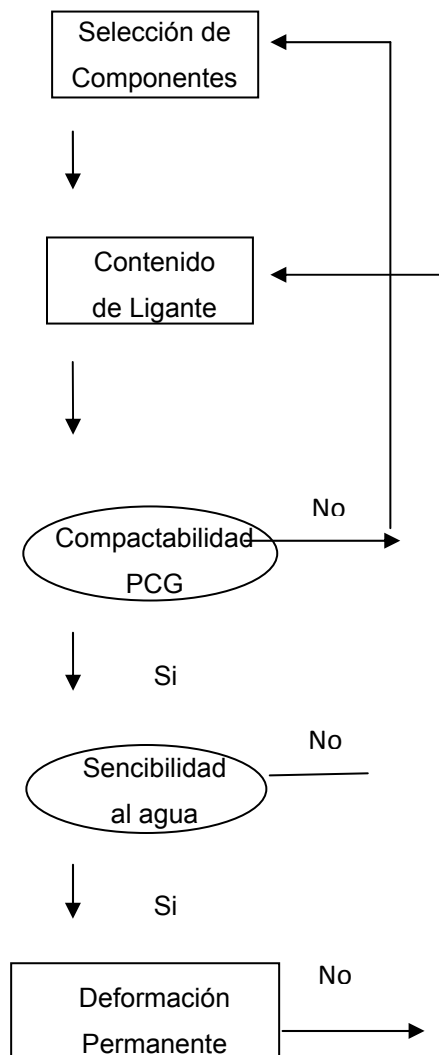
La secuencia que se debe seguir al realizar la Prueba de Comprobación es la mostrada en la figura 30.

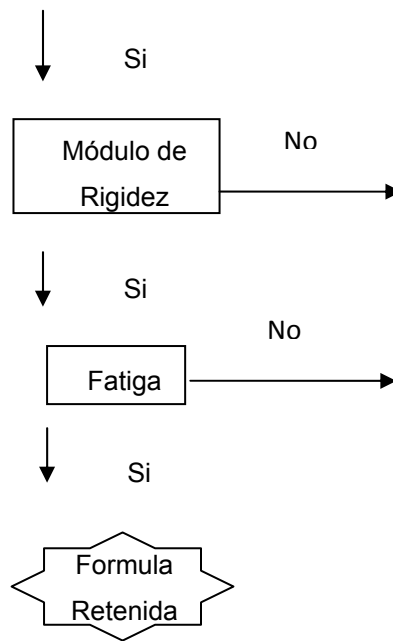
La primera prueba que se debe realizar es la de compacidad en la presa de cizallamiento giratorio. Una vez se comprueba que cumple con los requisitos establecido según el tipo de mezcla se continúa con las pruebas de sensibilidad al agua, deformación permanente, modulo de rigidez y finalmente fatiga. Dado el caso que el resultado de alguno de los ensayos se encuentren por fuera de los rangos determinados y se deba cambiar la formula de trabajo, es necesario volver

a realizar todas las pruebas para comprobar que los cambios no afectaron las propiedades ya ensayadas.

Los límites para cada uno de los ensayos, se encuentra en el Manual LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud (Manual LPC para la formulación de hormigones asfálticos en caliente).

**Figura 30. Secuencia ensayos LPC**





Fuente: Los autores

## CONCLUSIONES

La investigación tuvo como objetivo analizar los avances en el diseño de mezclas asfálticas para carpetas de rodadura. Esto representa un aspecto muy importante desde el punto de vista socioeconómico tanto para el país como en el ámbito internacional.

Se estudiaron los nuevos criterios de diseño desarrollados en diversas instituciones del extranjero, tales como el Strategic Highway Research Program, SHRP, de Estados Unidos y el Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, de Francia, Superpave y LPC respectivamente, así como el método empírico Marshall, que hasta la fecha es el más empleado en el mundo a pesar de sus limitaciones teóricas.

Las mezclas asfálticas deben ser formuladas con ensayos que representen las sollicitaciones a las que van a estar sometidos los materiales en la vía, es por esto que los nuevos métodos para el diseño de mezclas asfálticas están basados en ensayos de comportamiento de los materiales, que permiten su optimización para la construcción de pavimentos.

La transferencia tecnológica de metodologías desarrolladas en otros países a Colombia no debe considerarse hacerse de manera directa, debido a que nuestros recursos, infraestructura y formas de trabajo no son las mismas, por lo que es necesario principalmente comprender las ventajas que tiene la implementación de un nuevo método de diseño de mezclas asfálticas, para con ello poder identificar las variables críticas de este proceso de transferencia.

Las prácticas constructivas sanas, los adecuados diseños de las mezclas asfálticas y racionales controles de calidad de los materiales involucrados, son aspectos que no deben faltar para mejorar el comportamiento de las mezclas, cuando están incorporadas como carpeta asfáltica en los pavimentos.

## BIBLIOGRAFÍA

Zapata, F. 2000. Diseño de Mezclas Asfálticas SUPERPAVE. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Chihuahua.

Cepeda, J. 2002. Análisis del Comportamiento de Mezclas Asfálticas a Fisuración por Fatiga Mediante la Aplicación de un Nuevo Ensayo Dinámico a Tracción Directa. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cataluña.

Carlos Rodolfo Marín Uribe / María Rosa Guzmán Meléndez (2007). Modelación de una Estructura de Pavimento Utilizando los Módulos Dinámicos Obtenidos en Laboratorio Aplicando las Metodologías MARSHALL y SUPERPAVE, Revista de Ingenierías Universidad de Medellín.

Benavides, C. A.; Chavarro, E. 2000. Apuntes del curso de diseño de pavimentos. Universidad del Cauca, Instituto de Posgrado en Ingeniería Civil.

Federal Highway Administration. Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Publication N° FHWA – SA – 95 - 003. February 1995.

Tosticarelli, J., et al 1989. Contribución del grupo de investigación de Rosario al diseño estructural de pavimentos en Argentina. V Congreso Iberoamericano del Asfalto, tomo III. Punta del Este. Uruguay.

Rogelio Rodríguez Talavera, Víctor Manuel Castaño Meneses, Miguel Martínez. 2001, Emulsiones Asfálticas, Madrid Secretaria de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte.

Shell Bitumen. –Bitumes, 1991 Techniques et Utilisations.Ed Société des Petroles Shell.

Carlos Alejandro Cáceres Morales. 2004, Análisis de la Metodología Superpave para el Diseño de Mezclas Asfálticas en México Universidad de las Américas Puebla Escuela de Ingeniería y Ciencias Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.

JA GENARO, 1994. Análisis de Mezclas Asfálticas Compactadas

Laboratorio de Materiales de Construcción. Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico.

Instituto Chileno del Asfalto, 2000. Control de Densidad de Mezclas Diseñadas or el Metodo Marshall Boletin técnico, Asunción Chile

Yves Brosseaud, Eduardo Castañeda, 2005. Método LPC de Formulación de Mezclas Asfálticas. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais, France, laboratorio de Caracterización de Materiales de la Escuela de Ingeniería civil de la Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 2007. ISSN 0124-8170 Vol.17-2, Bogotá Colombia.

Manuel LPC d.aide à la formulation des enrobés à chaud, Sous la direction de Jean-Luc DELORME. 2005

Eugenio Oñate, 2000. Desarrollo y Aplicación de Modelos de Fractura en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Barcelona, España.

Rosado Castilla, Victorio, 1997. Sistema de Diseño de Mezclas Asfálticas SHRP Superpave, Argentina.

<http://www.sct.gob.mx>

<http://www.asphaltisbest.com>

[http:// www.ashaltinstitute.org](http://www.ashaltinstitute.org)

[http:// www.e.-asfalto.com](http://www.e.-asfalto.com)

<http://www.invias.gov.co>

<http://www.corasfaltos.com>