

**INFLUENCIA DE LA ENERGÍA Y TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS SOBRE SU COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA Y
COMPORTAMIENTO DINÁMICO, UTILIZANDO EQUIPO MARSHALL,
GIRATORIO (SUPERPAVE) Y COMPACTACIÓN A PRESIÓN.**

HEBERT LIZARDO DORADO DORADO

ALVARO GUARIN COBO

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

JULIO DE 2004

**INFLUENCIA DE LA ENERGÍA Y TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN DE
MEZCLAS ASFÁLTICAS SOBRE SU COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA Y
COMPORTAMIENTO DINÁMICO, UTILIZANDO EQUIPO MARSHALL,
GIRATORIO (SUPERPAVE) Y COMPACTACIÓN A PRESIÓN.**

HEBERT LIZARDO DORADO DORADO

ALVARO GUARIN COBO

**Trabajo de grado para optar al título
de Magíster en Ingeniería de Vías Terrestres**

Director

LUIS ALEJANDRO BETANCOURT (Q.E.P.D.)

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

JULIO DE 2004

Nota de Aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Popayán, 12 de Julio de 2004

CONTENIDO

	Pag
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEORICO	4
2.1. COMPACTACIÓN	4
2.1.1. Mecanismos de compactación	4
2.1.2. Compactación de mezclas asfálticas	7
2.1.3. Factores que afectan la compactación	8
2.1.4. Compactación en el laboratorio.	17
2.2. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	21
2.2.1 Densidad específica bulk (gsb).	21
2.2.2 Densidad específica aparente (gsa).	21
2.2.3 Densidad específica efectiva (gse).	21
2.2.4 Contenido de asfalto efectivo (pbe).	22
2.2.5. Vacíos en el agregado mineral (vma).	22
2.2.6. Vacíos llenos de asfalto (vfa).	23
2.2.7. Vacios con aire (va).	23
2.3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS	25
2.4. CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DE CONCRETOS ASFÁLTICOS.	28
2.4.1. Módulo resiliente.	28
2.4.2. Deformación permanente (creep).	29

	Pag
2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO - VARIANZA.	30
3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.	37
3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.	39
3.1.1. Ligante asfáltico.	39
3.2. SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.	48
3.3. COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS.	51
3.3.1. Compactación por presión estática.	53
3.3.2. Compactación por impacto.	55
3.3.3. Compactación por amasado.	56
3.4. CÁLCULO DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS	58
3.4.1. ANÁLISIS DE DENSIDAD – VACIOS.	59
3.5. ENSAYOS DINÁMICOS	59
3.5.1. Módulo resiliente.	59
3.5.2. Deformación permanente (creep).	61
3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.	67
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
4.1. COMPACTACIÓN POR PRESION ESTÁTICA.	71
4.2. COMPACTACIÓN POR IMPACTO	72
4.3. COMPACTACIÓN POR AMASADO.	73
4.4. COMPARACION ENTRE METODOS DE COMPACTACION	79
4.5. ESTABILIDAD MARSHALL	82
4.6. MÓDULO RESILIENTE.	84

4.7. DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP).	87
4.7.1. CÁLCULO DEL AHUELLAMIENTO	89
5. CONCLUSIONES	92
6. RECOMENDACIONES	96
BIBLIOGRAFÍA	97
ANEXOS	

LISTA DE FIGURAS

	Pag
Figura 1. Círculo de Mohr.	6
Figura 2. Relaciones volumétricas de una mezcla asfáltica.	25
Figura 3. Granulometría – invias	43
Figura 4. Granulometría – superpave	43
Figura 5: Variación de Gmm según el porcentaje de asfalto.	49
Figura 6. Nomograma de Heukelom.	52
Figura 7. Detalle de una briqueta de ensayo típica.	53
Figura 8. Curva de Calibración de presión estática.	54
Figura 9. Compactador giratorio de Superpave	55
Figura 10. Molde del compactador giratorio y parámetros de Compactación.	55
Figura 11. Curva de deformación vs. Tiempo de una muestra.	64
Figura 12. Diagrama de Tukey	68
Figura 13. Análisis gráfico compactación por presión.	71
Figura 14. Análisis Gráfico Compactación por impacto.	72
Figura 15. Análisis Gráfico Compactación por amasado.	74
Figura 16. Evaluación de N inicial y N máximo.	78
Figura 17. Análisis gráfico Estabilidad Marshall (Mecanismo de compactación).	82

	Pag
Figura 18. Análisis gráfico Estabilidad Marshall. (energía de compactación).	83
Figura 19. Análisis gráfico Módulo Resiliente	85
Figura 20. Ejemplo de cálculo del ahuellamiento.	89

LISTA DE TABLAS

	Pag
Tabla 1. Energía del equipo Marshall según tráfico esperado	27
Tabla 2. Propiedades del ligante asfáltico	40
Tabla 3. Ensayo de penetración al residuo del asfalto	40
Tabla 4. Fuentes de materiales pétreos	41
Tabla 5. Granulometría de los agregados	42
Tabla 6. Dosificación de los agregados	44
Tabla 7. Características de los agregados (INV)	45
Tabla 8. Características de los agregados (Superpave).	46
Tabla 9. Propiedades de la mezcla para cada contenido de asfalto	49
Tabla 10. Propiedades de la mezcla (5.8% de asfalto).	50
Tabla 11. Relación temperatura - viscosidad de la mezcla	52
Tabla 12. Compactación briquetas a presión estática	55
Tabla 13. Compactación briquetas por impacto	56
Tabla 14. Compactación briquetas por amasado	58
Tabla 15. Ensayo de módulo resiliente de una muestra	60
Tabla 16. Relación de briquetas – ensayo creep	66
Tabla 17. Análisis de resultados ensayo creep	86
Tabla 18. Resultados de ahuellamiento de las muestras.	91

LISTA DE ANEXOS

- Anexo No. 1: Ensayos de Laboratorio realizados al ligante asfáltico.
- Anexo No. 2: Ensayos de Laboratorio realizados a los agregados pétreos.
- Anexo No. 3: Diseño de la mezcla asfáltica. Método Marshall.
- Anexo No. 4: Resumen de briquetas elaboradas y composición volumétrica
- Anexo No. 5: Datos de salida ensayo de tensión indirecta en cinco pulsos por carga (módulo resiliente) con el equipo UTM.
- Anexo No. 6: Cuadro resumen de ensayo de módulo resiliente.
- Anexo No. 7: Datos de salida ensayo de carga dinámica uniaxial de flujo (Creep) con equipo UTM.
- Anexo No. 8: Graficas de esfuerzo vs. tiempo y deformación vs. Tiempo.
- Anexo No. 9: cuadro resumen de la variación de la altura de briqueta vs. el número de giros.
- Anexo No. 10: Gráficas de la variación del grado de compactación vs. el número de giros.
- Anexo No. 11: Variación del grado de compactación.
- Anexo No. 12: Variación de la estabilidad Marshall y flujo
- Anexo No. 13: Variación del módulo resiliente
- Anexo No. 14: Determinación de esfuerzos según Burmister (carga circular).

DEDICATORIA

A Dios por ofrecernos la oportunidad de realizar esta investigación y por iluminar el camino que nos permitió culminarla satisfactoriamente.

A la memoria del Ingeniero Luis Alejandro Betancourt, quien fue parte fundamental de este trabajo, por brindarnos su apoyo, su experiencia y su incondicional amistad.

DEDICATORIA:

- A mi Hijo Jose Carlos, motivo de superación y sacrificio.

- A mi esposa Claudia Constanza por su compañía, paciencia, apoyo incondicional y por su inmenso amor que siempre me ha demostrado.

- A mis padres Marina y José Fernando, a mis hermanos Jairo, Fanny y Fredy; y demás familiares y amigos que siempre han sido un soporte fundamental en mis logros alcanzados.

Hebert Lizardo.

DEDICATORIA

A mis padres Alvaro y Nelly, a mis hermanas Sandra y Diana, a mi abuela Alba, a mis sobrinos Juan David, Carolina y Juan Diego, y demás familiares y amigos que me apoyaron incondicionalmente.

A Marina, quien más que mi esposa es mi gran amiga. Por todo su amor, comprensión y apoyo. Te adoro con todas mis fuerzas.

Alvaro.

AGRADECIMIENTOS.

Al Ingeniero Jorge Peña Caicedo, quien es el autor de la idea original de este proyecto; aunque es importante mencionar que por diversos motivos, el trabajo final tiene un enfoque diferente al planteado inicialmente. También, el Ingeniero Jorge Peña, en calidad de Jefe de laboratorios de la Universidad del Cauca nos colaboró amplia y desinteresadamente con la ejecución de los ensayos requeridos.

A los Ingenieros Eugenio Chavarro Barreto, Julia Ruiz de Murgueitio y demás profesores del Departamento de Geotecnia de la Universidad del Cauca, quienes nos asesoraron permanentemente durante la ejecución del proyecto.

A la Universidad del Cauca por autorizarnos usar los laboratorios de suelos y de concretos , y en especial a todas las personas que laboran en ellos.

Al Profesor Yilton Riascos, Universidad del Cauca, por su valiosa colaboración en el diseño y análisis estadístico del trabajo de investigación.

Al Ingeniero Luis Carlos Vásquez Torres, Profesor de la Universidad Nacional sede Manizales, quien no solo nos dio la oportunidad de desarrollar la caracterización dinámica de la mezclas asfálticas (módulos Resilientes y ensayos de creep) en las instalaciones de dicha institución, sino que también nos asesoró durante la ejecución de dichas pruebas.

Al Dr Reynaldo Roque, Profesor de University of Florida, quien nos guió durante la fase de análisis e interpretación de los resultados obtenidos en las pruebas de creep.

Al Ingeniero Ary Bustamente, Director del Instituto de Posgrados en Ingeniería Civil, quien nos colaboró permanentemente durante las diversas etapas del proyecto.

1. INTRODUCCIÓN

La compactación es el factor más relevante para lograr un buen desempeño de una mezcla asfáltica. Una adecuada compactación de la mezcla incrementa la vida a fatiga, reduce deformación permanente, disminuye oxidación o envejecimiento, mitiga daño por humedad, incrementa resistencia y estabilidad y baja la posibilidad de agrietamiento por bajas temperaturas; en otras palabras garantiza una carpeta de rodadura estable y durable.

La compactación de mezclas asfálticas depende de los agregados, del ligante asfáltico, de la temperatura de la mezcla, de las condiciones ambientales en obra, del espesor de la carpeta asfáltica y de las condiciones de apoyo.

En este trabajo, sobre muestras compactadas en laboratorio se pretende profundizar en el conocimiento del efecto de la temperatura de compactación, mecanismos y energía de compactación. Es fundamental resaltar que esta investigación esta dirigida a evaluar dichos efectos con base en los resultados de caracterización obtenidos en el laboratorio.

Para el análisis de los mecanismos de compactación, se utilizaron tres (3) equipos de compactación: Marshall (compactación por impacto), Giratorio (densificación por

amasado), Prensa hidráulica (compactación por presión estática). La determinación de las energías de compactación se hizo con base en las condiciones estandarizadas para los métodos Superpave y Marshall y adicionalmente se tomó el contenido de vacíos de las briquetas (%Gmm) como punto de referencia o de comparación entre las energías de compactación aplicadas por los diferentes mecanismos; sin embargo, es muy importante resaltar que es posible que no se hayan seleccionado iguales niveles de energías de compactación para los distintos métodos.

Se realizaron evaluaciones de tipo volumétrico (Porcentaje de compactación - %Gmm) y dinámico (Módulos Resilientes y Creep). Anteriores investigaciones indican que el porcentaje de compactación (%Gmm) obtenido en el laboratorio puede ser altamente variable, dependiendo del método usado.

El propósito de cualquier proceso de compactación en el laboratorio es simular de la mejor manera posible la orientación de las partículas producidas en el terreno por los cilindros compactadores y alguna cantidad de tráfico adicional. La compactación en el laboratorio es muy rápida, usualmente requiere menos de cinco minutos; en contraste, la compactación en el terreno puede no ser lograda hasta treinta minutos o más después de la colocación de la mezcla. De igual manera, en el laboratorio, la temperatura de la mezcla es relativamente constante mientras que en la vía la temperatura del material decrece continuamente con el tiempo.

Otro aspecto es que en el laboratorio, la mezcla asfáltica es compactada sobre una

base rígida (pieza metálica), mientras que en el campo se puede encontrar una amplia variedad de materiales de apoyo.

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, es muy importante aclarar que el alcance de esta investigación se limita a la observación, análisis e interpretación de los procedimientos y resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Finalmente, se propone adelantar futuras investigaciones con el fin de correlacionar la información obtenida en este trabajo con la compactación de mezclas asfálticas en la vía.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. COMPACTACIÓN

Se entiende por compactación de un material; llámese suelo, concreto hidráulico o mezcla asfáltica, al proceso mecánico por el cual se mejoran sus características con el fin de lograr una estructura más estable y duradera.

La compactación de una mezcla asfáltica es un proceso mecánico mediante el cual se reduce su volumen al disminuir los vacíos de la mezcla y aumentar su densidad, parámetros estos que son controlados durante el proceso. El resultado final es alcanzar una mezcla compacta con propiedades para comportamiento óptimo frente a los efectos del agua, del aire y del tránsito.

Cada obra tiene requerimientos particulares; dicho de otra manera, las propiedades que son claves para una obra pueden no serlo para otra.

2.1.1. Mecanismos de Compactación. La mayoría de las investigaciones sobre compactación de partículas han sido realizadas en el marco de la ingeniería geotécnica; los principios básicos de la compactación de mezclas asfálticas asfaltos son similares a la compactación de suelos. La adición de un material visco-elástico tal como el ligante asfáltico, a un suelo granular, complica el

problema.

Sowers enunció tres maneras en que se puede compactar un suelo: Reorientación de partículas; rompimiento de los enlaces entre ellas seguida por reorientación; y distorsión de partículas.

La densificación de suelos cohesivos es básicamente el resultado de distorsión y reorientación de partículas mientras que en los materiales granulares la densificación es el resultado del fracturamiento y reorientación de los agregados. Sin embargo, la fricción interna entre partículas se opone a la reorientación de las mismas.

El contenido de humedad de suelos, similar al contenido de asfalto en mezclas asfálticas calientes, juega un papel clave en la densificación. En materiales cohesivos, los enlaces entre partículas disminuyen al aumentarse el contenido de humedad. De igual manera, en materiales granulares la tensión capilar entre las partículas disminuye al incrementar el contenido de humedad. Sowers resaltó que la disminución en las presiones de contacto entre partículas reduce la fricción interna del suelo. El procedimiento más efectivo para la densificación del material es garantizar el contenido óptimo de humedad en el momento de la compactación. Otro elemento básico para una compactación efectiva es el confinamiento lateral del material; en el laboratorio, dicho confinamiento de la mezcla es logrado con el molde. En el campo, el material debe tener una adecuada resistencia al flujo

lateral. Geller demostró que sin confinamiento lateral no puede haber compresión vertical.

La resistencia de un concreto asfáltico es función de la cohesión del ligante, de la fricción interna de los agregados y de las fuerzas de confinamiento. Estas fuerzas pueden ser mejor ilustradas mediante el círculo de Mohr (Figura No.1), donde la ecuación de Coulomb es usada para calcular la resistencia al corte:

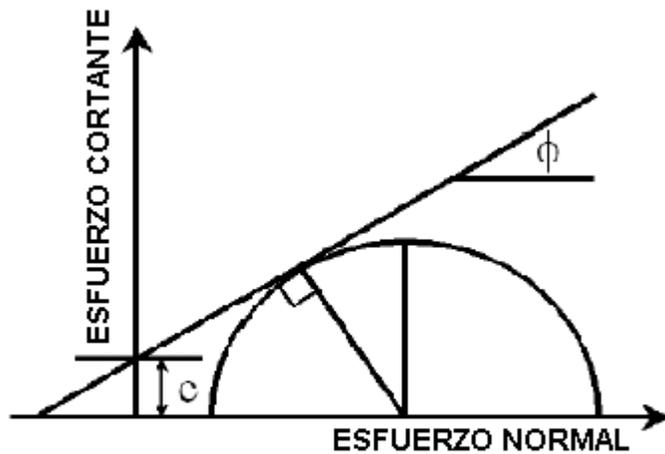


Figura 1. Círculo de Mohr.

$$\tau = C + \sigma \tan\phi$$

donde:

τ = Resistencia al corte

C = Cohesión

σ = Presión de confinamiento

ϕ = Angulo de fricción interna

2.1.2. Compactación de Mezclas Asfálticas. Compactación es el proceso por el cual el concreto asfáltico es comprimido y reducido en volumen. La compactación reduce contenido de vacíos e incrementa el peso unitario o densidad de la mezcla. Como resultado de este proceso, los agregados revestidos de asfalto en la mezcla se unen estrechamente, lo cual incrementa la trabazón entre agregados y la fricción interparticular reduciendo el contenido de vacíos en la mezcla asegurando de este modo que tendrá la capacidad de soporte necesaria para resistir las cargas del tráfico esperadas y suficiente durabilidad.

La compactación de una mezcla asfáltica puede considerarse que tiene un comportamiento entre un suelo cohesivo y un suelo granular; esta ocurre mediante un proceso de distorsión y reorientación de partículas.

Nijboer explicó las tres fuerzas principales que resisten la compactación en una mezcla asfáltica:

1. El ángulo de fricción interna (resistencia friccional).
2. La resistencia inicial (resistencia cohesiva y trabazón entre agregados).
3. La resistencia al flujo de la mezcla (viscosidad del asfalto en el momento de mezclado).

El ángulo de fricción interna es función de las propiedades de los agregados; la resistencia inicial es función de las características del ligante asfáltico y del llenante mineral actuando como una película delgada que recubre el agregado. La resistencia al flujo de la mezcla es función de las propiedades de los agregados y del ligante asfáltico.

2.1.3. Factores que afectan la Compactación. Cuatro factores afectan principalmente la eficiencia de un equipo de compactación para densificar una mezcla asfáltica: Propiedades de los materiales de la mezcla, variables ambientales (temperatura del aire, temperatura de la base, velocidad del viento y radiación solar), condiciones del sitio (espesor, densidad, uniformidad de la capa y condiciones del apoyo sobre el cual se compacta), y tipo del equipo de compactación utilizado.

Debido a que el presente trabajo está enfocado a estudiar la compactación en el laboratorio, a continuación se discuten las variables directamente relacionadas con este tipo de compactación (propiedades de los materiales y de equipos de compactación utilizados en el laboratorio y sus respectivos mecanismos de compactación).

- **Propiedades de los Materiales.** Los materiales de un concreto asfáltico, ligante asfáltico, agregados pétreos y filler, tienen un gran efecto sobre la mezcla obtenida y su comportamiento en la vía. A continuación se describen las

características de cada material que pueden ser más influyentes y los posibles efectos sobre la respuesta estructural de la mezcla.

❖ **Ligante asfáltico.** El tipo y la cantidad de cemento asfáltico utilizado afectan la compactabilidad de una mezcla asfáltica.

El ligante asfáltico es considerado un material visco-elástico porque posee propiedades tanto de materiales viscosos como de materiales elásticos; así, el ligante asfáltico afecta la compactación en diversas formas. Un cemento asfáltico de alta viscosidad generalmente produce una mezcla más rígida, por lo cual se requerirá una mayor energía de compactación para lograr la densidad requerida.

✓ **Temperatura del asfalto.** Una característica muy fundamental acerca del comportamiento de los cementos asfálticos es la susceptibilidad a la temperatura y el tiempo de aplicación de carga, la mayoría de los ensayos de caracterización de cementos asfálticos y mezclas asfálticas especifican la temperatura; sin una temperatura dada no se podría adoptar ningún criterio con respecto al ensayo. A altas temperaturas el asfalto se comporta como un líquido viscoso y fluye, a bajas temperaturas el asfalto se comporta como un sólido elástico (viscosidades altas), esto es, se deforma al ser cargado y retornan a su forma original al ser descargado.

El comportamiento del cemento asfáltico depende también del tiempo de aplicación de carga. Para la misma carga y el mismo asfalto, diferentes tiempos de aplicación de carga resultan propiedades diferentes; por esta razón los ensayos a

los cementos asfálticos, especifican la velocidad de carga.

El flujo viscoso del asfalto es dependiente de la temperatura y del tiempo de aplicación; es decir los efectos del tiempo y de la temperatura están correlacionados (el comportamiento de un asfalto a alta temperatura durante cortos períodos de tiempo es equivalente al comportamiento del asfalto a bajas temperaturas durante largos períodos de tiempo).

A temperatura ambiente el asfalto es virtualmente un sólido, mientras que a temperaturas altas es un fluido. En condiciones cálidas o bajo cargas sostenidas (zonas de parqueo), el cemento asfáltico actúa como un líquido viscoso (bajo estas circunstancias el agregado mineral es el que soporta la carga).

Al incrementar la temperatura de una mezcla, la viscosidad del asfalto decrece reduciendo la rigidez total de la mezcla. Si una mezcla está muy caliente esta será inestable y se desplazará lateralmente bajo el cilindro compactador.

A temperaturas intermedias (condiciones ambientales), el ligante asfáltico tiene las características tanto de líquido viscoso como de sólido elástico. El asfalto es un excelente material cohesivo para usar en pavimentación pero a la vez es un material complicado de entender y explicar: Cuando se calienta, actúa como un lubricante permitiendo que el agregado sea mezclado, recubierto y compactado para garantizar una superficie densa y suave. Cuando se enfría, el asfalto trabaja como ligante para mantener los agregados juntos en una matriz sólida; en este estado el comportamiento del asfalto es conocido como visco elástico.

✓ **Envejecimiento del asfalto.** Debido a que los cementos asfálticos están compuestos por moléculas orgánicas, estos reaccionan con el oxígeno del ambiente. Dicha reacción es llamada oxidación y cambia la estructura y composición de las moléculas de asfalto. La oxidación hace que el cemento asfáltico sea más frágil, ocasionando endurecimiento, el cual ocurre de una manera relativamente lenta en un pavimento; por esta razón los pavimentos asfálticos viejos son más susceptibles al agrietamiento. Los pavimentos asfálticos compactados incorrectamente pueden presentar endurecimiento por oxidación prematura; en este caso, la mala compactación deja un alto porcentaje de vacíos interconectados, lo cual permite que penetre mucho más aire en la mezcla ocasionando oxidación del pavimento.

En la práctica, gran parte del endurecimiento por oxidación ocurre antes que el asfalto sea puesto en obra. En la planta de mezcla asfáltica, el ligante asfáltico es

adicionado a los agregados calientes y la mezcla es mantenida a temperaturas elevadas por un período de tiempo. Debido a que el ligante asfáltico recubre al agregado en finas películas, el proceso de oxidación ocurre a una velocidad mucho mayor.

Otras formas de endurecimiento incluyen volatilización y endurecimiento físico. La volatilización ocurre durante los procesos de mezclado y construcción, cuando los componentes volátiles del asfalto tienden a evaporarse. El endurecimiento físico se ocasiona cuando el cemento asfáltico ha sido expuesto a bajas temperaturas durante largos períodos de tiempo.

En climas fríos o bajo aplicación de carga rápida, el cemento asfáltico se comporta como un sólido elástico aunque este puede llegar a ser muy frágil y romperse cuando es cargado excesivamente. De igual manera, si una mezcla está muy fría, ésta se rigidiza y requiere un esfuerzo de compactación mayor para ser densificada.

Las tres características de un ligante asfáltico más influyentes para el comportamiento de la mezcla asfáltica son susceptibilidad a la temperatura, viscoelasticidad y envejecimiento.

La influencia del ligante en la resistencia a la compactación de una mezcla asfáltica fue mostrada en un estudio por McLeod. Un cemento asfáltico de alta

viscosidad a una temperatura de compactación típica de 135 °C tiene una viscosidad de aproximadamente 5 poises. La viscosidad del mismo cemento asfáltico a 63 °C, cuando el proceso de compactación frecuentemente termina, fue de 5000 poises (1000 veces mayor). Las respectivas estabilidades Marshall de la mezcla a las dos temperaturas citadas fueron 667 Newtons y 6672 Newtons (diez veces mayor). Como puede observarse en una diferencia de 72 °C, un incremento de 1000 veces en la viscosidad del asfalto resultó en un incremento de 10 veces en la resistencia de la mezcla.

❖ **Agregados.** Las características de los materiales pétreos influyen sus propiedades y por lo tanto afectan el comportamiento del concreto asfáltico. Dichas características inciden la cantidad de ligante asfáltico requerido y pueden tener un efecto durante el proceso constructivo del pavimento, especialmente durante la colocación de la mezcla.

La gradación, textura superficial, angularidad y porosidad son las características de los agregados que más afectan la trabajabilidad y la resistencia a la compactación de una mezcla.

Una de las más significativas propiedades de los agregados para su uso en los pavimentos es la gradación. A mayor tamaño de los agregados y/o altos porcentajes de agregado grueso se reduce la trabajabilidad de la mezcla y por lo tanto se requieren altos esfuerzos de compactación.

La textura superficial de los agregados es el factor que más afecta su resistencia a la fricción; Por ello esta característica afecta en gran medida la resistencia de la mezcla al ahuellamiento; a mayor rugosidad se obtiene una mezcla más resistente a la deformación. Sin embargo, una textura superficial rugosa produce un concreto menos trabajable.

La forma de los agregados igualmente influencia la resistencia al ahuellamiento; al usar un material grueso de alta angularidad y con más agregado fino resulta en un alto grado de fricción interna y por lo tanto alta resistencia al corte, lo cual incrementa la resistencia de la mezcla a deformaciones permanentes.

La cantidad de cemento asfáltico que es absorbido por los agregados puede afectar en forma significativa las propiedades del concreto asfáltico. Algunos agregados con alta porosidad absorben más ligante que aquellos agregados con baja porosidad, causando que la mezcla sea más rígida y difícil de compactar.

Los agregados deben proveer suficiente resistencia al corte para soportar las repeticiones de carga requeridas. La resistencia al corte de los agregados es fundamental en la mezcla asfáltica por que esta es la que resiste el ahuellamiento de la mezcla. La resistencia al corte depende básicamente de la resistencia al desplazamiento o fricción interna desarrollada por los agregados

❖ **Filler.** El contenido de finos afecta la compactabilidad de una mezcla porque estos se combinan con el cemento asfáltico para proveer las fuerzas cohesivas de la mezcla. El material fino incrementa la viscosidad efectiva de la matriz ligante y por lo tanto se reduce la compactabilidad de la mezcla.

Una mezcla asfáltica con bajo contenido de finos puede ser difícil de compactar. Al incrementar la cantidad de filler se aumenta la rigidez de la mezcla; sin embargo, demasiado material fino también puede afectar la compactabilidad del concreto.

• **Propiedades de la mezcla.** La temperatura de la mezcla afecta el proceso de compactación significativamente y como consecuencia sus propiedades. Una mezcla será más fácil de compactar a una temperatura relativamente alta que a una temperatura relativamente baja; sin embargo, si la temperatura de la mezcla es muy alta, el concreto puede ser inestable y difícil de compactar hasta que disminuya la temperatura. Por el contrario, si la temperatura de la mezcla es muy baja, se requerirá incrementar la energía de compactación para alcanzar la densidad especificada; inclusive, puede ser que esta nunca sea alcanzada.

A altas temperaturas, la viscosidad del cemento asfáltico es baja y hace que este actúe como un líquido, permitiendo que las partículas de agregados se acomoden apropiadamente. A temperaturas ligeramente más bajas, el ligante actúa como un lubricante permitiendo que el agregado se mueva y densifique durante la

compactación. Además la reducción de la temperatura provoca el endurecimiento del ligante y así su cohesión evita una densificación adicional.

La trabajabilidad de la mezcla también es afectada por la susceptibilidad térmica del ligante asfáltico. Si el ligante asfáltico tiene alta susceptibilidad térmica, se dispondrá de menor tiempo para la compactación porque la mezcla se rigidiza rápidamente con una disminución de la temperatura.

La trabajabilidad de la mezcla se incrementa al aumentarse la temperatura de la misma. El límite superior para la temperatura de mezcla es aproximadamente 150 °C; temperaturas superiores pueden resultar en el daño del asfalto por el endurecimiento acelerado. El límite inferior para una compactación efectiva es aproximadamente 85 °C; a temperaturas menores se requieren enormes esfuerzos de compactación para finalmente obtener mínima o ninguna ganancia en la densificación de la mezcla.

Kennedy comprobó que bajas temperaturas de compactación tienen un efecto adverso sobre las propiedades ingenieriles del concreto asfáltico tales como resistencia a la tensión, módulo resiliente y estabilidad Marshall, lo cual reduce la durabilidad del pavimento.

Hadley encontró que de siete factores estudiados (tipo de agregado, gradación del agregado, tipo de cemento asfáltico, contenido de cemento asfáltico, temperatura

de mezcla, temperatura de compactación y temperatura de curado), la temperatura de compactación fue el más influyente en las propiedades ingenieriles de la mezcla.

De otro lado, Brown reportó que temperaturas mayores de 155 °C pueden causar problemas de compactación debido al desplazamiento lateral de la mezcla y acelerar el proceso de oxidación del ligante asfáltico lo cual puede ocasionar que el pavimento sea rígido y frágil.

2.1.4. Compactación en el laboratorio. A continuación se describen los mecanismos de compactación contemplados en la presente investigación:

- **Compactación por presión estática (máquina universal).** Se basa en la aplicación de una carga constante sobre la superficie de la mezcla asfáltica. Este mecanismo de compactación tiene el inconveniente de que a mayor presión, es mayor la fuerza de fricción que se desarrolla entre los agregados. Al aumentarse dicha presión, se desarrolla una fricción interna mayor entre los agregados lo cual dificulta el proceso de compactación.

Al utilizar el método de compactación estática es necesario aplicar altas presiones para poder lograr la densidad de la mezcla requerida, lo cual puede fracturar los agregados y disminuir considerablemente la película del ligante, por lo cual la micro estructura de la mezcla compactada es diferente a la obtenida en la vía.

Generalmente se utiliza la prensa hidráulica, trabajando con los mismos elementos requeridos para desarrollar el ensayo de Inmersión - Compresión de mezclas asfálticas; norma I.N.V. E-738

- **Compactación por impacto (equipo Marshall).** Cuando un cuerpo se levanta a una cierta altura sobre una superficie y se deja caer, la presión que ejerce sobre esta es varias veces mayor que la presión que ejerce el mismo cuerpo estando apoyado estáticamente sobre dicha superficie. En esta característica se basa el principio de compactación por impacto.

El martillo Marshall se deja caer repetidamente sobre la muestra en un número de veces que depende del nivel de tráfico esperado (compactación por impacto). Sin embargo, no simula el efecto de amasado producido por los cilindros compactadores (no crea fuerzas de corte horizontal) y por lo tanto este método no es representativo del proceso de densificación de la mezcla en vía. Además, la estabilidad Marshall no permite estimar adecuadamente la resistencia al corte del concreto asfáltico. Estas razones dificultan garantizar que la mezcla diseñada tenga una resistencia al ahuellamiento apropiada.

El compactador Marshall es efectivo en densificar mediante fracturamiento y distorsión de partículas pero sin acción de amasado; la densificación mediante reorientación de partículas es mínima, por lo tanto no es representativa de la compactación en la vía. Los procesos de compactación de briquetas se hacen siguiendo la norma ASTM: D-1559

- **Compactación por amasado (equipo giratorio).** El compactador giratorio es ideal para producir muestras de mezclas asfálticas compactadas en laboratorio que sean representativas de la compactación en la vía. Las pruebas de tensión y corte no son útiles si el espécimen de laboratorio no es representativo de las condiciones de campo. Investigadores concluyeron que el compactador giratorio hace el mejor trabajo de simulación de la compactación del terreno; por su acción de corte representa la densificación mediante reorientación de partículas, la cual también es lograda por los cilindros compactadores en la vía.

En este mecanismo de compactación se puede presentar segregación de las partículas más grandes hacia los lados del molde, lo cual resulta en mayores contenidos de vacíos hacia el exterior de la muestra, Harvey 1994; Voskuilen 1996.

A continuación se muestra una descripción general del equipo compactador Giratorio Superpave.

La base para el Compactador Giratorio Superpave fue el compactador giratorio de Texas modificado para aplicar los principios de compactación del compactador giratorio francés. Los moldes de 6 pulgadas de diámetro (150mm) pudieron acomodar mezclas con agregados de un tamaño máximo de hasta 50 mm (37.5nominal). Los investigadores de SHRP modificaron el compactador giratorio de Texas reduciendo el ángulo y velocidad de giro y adicionando un registro en tiempo real de la altura.

El Compactador Giratorio Superpave está compuesto de un pórtico de reacción que provee una estructura no flexible contra la cual el pistón de carga empuja cuando se compactan los especímenes. La base del Compactador Giratorio Superpave rota y está fijada al pórtico de carga; soporta al molde durante la compactación. Apoyos de reacción son usados para poseionar el molde a un ángulo de 1.25° (ángulo de compactación del Compactador Giratorio Superpave). El motor eléctrico acciona la base rotatoria a una velocidad constante de 30 revoluciones por minuto.

Un sistema mecánico o hidráulico aplica cargas al pistón de carga, el cual somete al espécimen a una presión de compactación de 600 Kpa. El diámetro del pistón de carga coincide nominalmente con el diámetro interno del molde (150mm). Un medidor de presión con una señal digital mide la presión durante la compactación. A medida que el espécimen se densifica durante la compactación, el medidor de presión indica al sistema de carga que debe ajustar la posición del pistón de carga de modo que la presión de compactación sea constante durante todo el proceso.

La medición de la altura del espécimen es una gran ventaja del compactador giratorio Superpave. Conociendo el peso del material contenido en el molde, el diámetro del molde, y la altura del espécimen, puede estimarse la gravedad específica del espécimen en todo momento durante el proceso de compactación.

La fabricación de las briquetas se hace siguiendo el procedimiento establecido en

la norma ASHTTO: T 312-03.

2.2. COMPOSICIÓN VOLUMÉTRICA DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

La composición volumétrica de las mezclas asfálticas comprende el análisis de varias propiedades volumétricas que incluyen vacíos totales en la mezcla (VTM), vacíos en el agregado mineral (VMA) y vacíos llenos de asfalto (VFA).

2.2.1 Densidad específica bulk (Gsb).

Es la relación de la masa de aire por unidad de volumen de un material permeable, incluyendo los vacíos permeables e impermeables del material.

2.2.2 Densidad específica aparente (Gsa).

Es la relación de la masa de aire por unidad de volumen de un material impermeable.

2.2.3 Densidad específica efectiva (Gse).

Es la relación de la masa de aire por unidad de volumen de un material permeable, excluyendo los vacíos permeables del material.

2.2.4 Contenido de asfalto efectivo (Pbe).

Es el contenido total de asfalto de una mezcla menos la porción de asfalto absorbido por los agregados.

2.2.5. Vacíos en el agregado mineral (VMA).

Es el volumen de vacíos entre partículas de una mezcla compactada, el cual incluye los vacíos con aire y el contenido de asfalto efectivo expresado como porcentaje del volumen total de la muestra.

Vacíos en el agregado mineral (VMA), es probablemente la propiedad volumétrica de mayor importancia en el diseño, depende de la gradación, forma y textura superficial de los agregados. VMA incluye vacíos con aire, es decir la suma de VTM y VFA. Valores bajos de VMA indican películas bajas de revestimiento sobre el agregado por que no hay vacíos suficientes para que el asfalto revista adecuadamente las partículas sin sobrellenar el espacio vacío, lo cual puede resultar en un ahuellamiento excesivo y prematuro.

2.2.6. Vacíos llenos de asfalto (VFA).

Es el porcentaje de los vacíos en el agregado mineral que es ocupado por asfalto efectivo; este es expresado como la relación entre $(VMA - V_a) / VMA$.

Cuando el VFA es muy alto (mayor que 85%), los vacíos son considerados sobrellenados con asfalto, lo cual resulta en baja estabilidad de la mezcla.

2.2.7. Vacíos con aire (V_a).

Es el volumen total de aire entre las partículas de agregado revestidas en una mezcla compactada, expresada como porcentaje del volumen Bulk de la mezcla compactada.

La propiedad clave durante la construcción es los vacíos con aire, la cual tiene relación directa con la densidad. Investigaciones han demostrado que un contenido de vacíos de 4% es ideal para la mayoría de mezclas con gradación densa. Generalmente, las mezclas que tienen bajo porcentaje de vacíos (menor que 3%) son inestables y tienden a presentar ahuellamiento prematuro. Por el contrario, mezclas con alto porcentaje de vacíos (mayor que 8%) generalmente son permeables al agua incrementando la velocidad de oxidación lo cual produce agrietamiento y/o degradación prematura del concreto asfáltico. Sin embargo éstas son generalizaciones; dicho de otra manera, es posible construir un excelente pavimento el cual ha sido compactado al 98% de densidad (2% vacíos).

El contenido de vacíos es el factor que más afecta la vida útil del concreto asfáltico; un incremento excesivo en el contenido de vacíos esta asociado con una disminución en las características estructurales de la mezcla como módulo resiliente, vida a fatiga y resistencia al creep.

La deformación permanente (creep) de un pavimento flexible puede ser debida a densificación o a deformación por esfuerzo cortante de la mezcla. La compactación adicional por tráfico (densificación), puede ser reducida asegurando buena compactación durante la construcción. La deformación por corte ocurre cuando una o más capas del pavimento pierden capacidad de soporte; la presión vertical sobre capas inestables puede ser reducida usando mezclas más rígidas obtenidas por una mejor compactación.

A continuación, se detallan los volúmenes de cada uno de los materiales, extractados del peso de la muestra (porcentaje de asfalto, agregados y pesos específicos de cada uno):

Relaciones volumétricas.

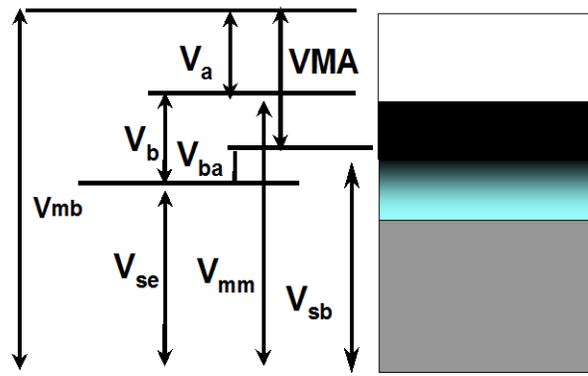


Figura 2. Relaciones volumétricas de una mezcla asfáltica.

V_{mb} = Volumen de la muestra compactada

V_a = Volumen de vacíos

V_b = Volumen de asfalto o bitumen

V_{ba} = Volumen de asfalto absorbido

V_{sb} = Volumen bruto ("Bulk") de agregado

W_b = Peso del asfalto

W_s = Peso del agregado

2.3. DISEÑO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS.

Un concreto asfáltico es el resultado de mezclar el ligante asfáltico y los agregados en diferentes proporciones en el laboratorio. Las mezclas resultantes son evaluadas usando un conjunto de criterios estandarizados que permiten la selección del contenido de asfalto apropiado.

El contenido óptimo de asfalto es seleccionado para garantizar larga vida y estabilidad de la mezcla.

Los métodos de diseño más usados internacionalmente son Marshall, Hveen y Superpave; en nuestro medio el método más utilizado es el método Marshall y actualmente se están desarrollando investigaciones respecto a la aplicación del método Superpave para nuestras condiciones locales.

El método Marshall fue desarrollado por U.S. Army Corps of Engineers (USACE), para un diseño de mezclas para pavimentos de aeropuertos durante la segunda guerra mundial. Una de sus grandes ventajas es el análisis de las propiedades volumétricas de la mezcla; lo cual garantiza la selección de las adecuadas proporciones de los materiales para lograr un concreto asfáltico estable y durable. Además, el equipo es económico, portátil y facilita las operaciones de control de calidad. La norma establece todos los requisitos que debe cumplir el proceso de laboratorio. (ASTM designación D-1559).

Las dos principales características del método Marshall son el análisis de densidad y vacíos y las pruebas de estabilidad y flujo de las muestras compactadas. La estabilidad es la máxima carga que soporta la muestra a 60 °C, el flujo es la deformación total que ocurre en el espécimen entre los estados de carga nula y carga máxima durante la prueba de estabilidad.

En general, son considerados cinco diferentes contenidos de asfalto (se elaboran tres muestras de cada contenido); se preparan briquetas de 4" de diámetro (101.60 mm) y 2.5" de altura (65 mm) para los contenidos de asfalto cercanos al porcentaje óptimo estimado; compactadas con el martillo Marshall estándar de 10 libras colocado adecuadamente a una altura de caída de 457 mm.

Este método sugiere seleccionar la temperatura de la mezcla correspondiente a una viscosidad del asfalto igual a 170 más o menos 20 centistokes, temperatura de compactación correspondiente a una viscosidad del asfalto de 280 más o menos 30 centistokes; energía de compactación, de acuerdo con el nivel de tráfico esperado (liviano, mediano, pesado), como se muestra en la tabla No.1:

Tabla 1. Energía del equipo Marshall según tráfico esperado

Tipo de tráfico	Golpes por cara
LIVIANO	35
MEDIANO	50
PESADO	75

Se hace la determinación de densidad Bulk, porcentaje de vacíos, porcentaje de VMA, porcentaje de VSA y VFA y las pruebas de estabilidad Marshall y flujo. Cada una de las anteriores propiedades se analiza frente al contenido de asfalto.

Finalmente, se verifican los criterios para aceptar el diseño de la mezcla, definir el contenido óptimo de ligante asfáltico para el cual quedan establecidas las propiedades de la mezcla.

2.4. CARACTERIZACIÓN DINAMICA DE CONCRETOS ASFÁLTICOS.

2.4.1. **Módulo resiliente.** Uno de los principales propósitos de medir el módulo resiliente de materiales visco elásticos es averiguar información que pueda ser usada como dato dentro de modelos para diseñar o evaluar la respuesta estructural de concretos asfálticos.

Este ensayo consiste en la aplicación de carga cíclica usando los principios de distribución de esfuerzos de la prueba de tensión indirecta. La principal ventaja de este método es su simplicidad y la capacidad de ensayar briquetas con tamaño Marshall; lo cual dentro del marco de esta investigación permite ensayar también las muestras compactadas con el equipo giratorio y con la prensa hidráulica.

El ensayo de módulo resiliente con cinco pulsos controlados, es una prueba de tensión indirecta que reúne los requerimientos del draft for development DD 213 (1996) publicado por el British Standards Institute.

Este ensayo se basa en la aplicación de carga diametral en pulsos sobre la muestra y en el registro de la respectiva deformación unitaria horizontal, medida a 90° de la fuerza aplicada. Debido a que la deformación unitaria en el plano en que es cargada la muestra no se mide, no es posible calcular la relación de Poisson y por lo tanto dicho valor debe asumirse.

El módulo de elasticidad se calcula como sigue:

$$E = [L(\mu+0.27)] / (D*t)$$

Siendo:

E = Módulo de elasticidad (Mpa)

L = carga máxima vertical aplicada (N)

D = Amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga (mm)

T = Espesor promedio de la briqueta (mm)

μ = Relación de Poisson.

Para el desarrollo de este trabajo, se adopto una relación de Poisson igual a 0.35 debido a que este es un valor altamente utilizado para materiales asfálticos, el cual permite calcular valores muy aproximados de módulos resilientes.

2.4.2. Deformación permanente (creep). Este ensayo es usado principalmente para determinar las propiedades visco elásticas de la mezcla asfáltica. Para materiales con comportamiento viscoso, las deformaciones se incrementan con el tiempo bajo la aplicación de un esfuerzo constante.

Es importante mencionar que esta prueba no solo permite determinar la ley de Creep sino que también permite correlacionar sus resultados con la profundidad del ahuellamiento que puede presentarse en un concreto asfáltico. En términos generales, la tasa de crecimiento de la deformación permanente esta directamente relacionada con el incremento del daño de un concreto asfáltico.

El ensayo de carga dinámica uniaxial de flujo cumple los requerimientos del draft for development publicado por el British Standard Institute (BSI) como un método para la determinación de la resistencia a la deformación unitaria permanente de mezclas bituminosas sometidas a carga uniaxial no confinada.

Para caracterizar el material visco elástico, se calcula la Ecuación de Creep a diferentes tiempos (ver numeral 3.5.2.):

2.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO – VARIANZA.

El análisis de varianza ANOVA es usado para encontrar el efecto principal y los efectos de interacción de las variables independientes, llamadas factores, sobre un intervalo de variables dependientes. Efecto principal es el efecto directo de una variable independiente sobre una variable dependiente; mientras que efecto de interacción es la suma de efectos de dos o más variables independientes sobre la variable dependiente.

El análisis estadístico se divide en tres grandes tipos: univariado, bivariado y multivariado.

En el análisis univariado se describen las características de una variable. También es conocido como estadística descriptiva. (Este es el análisis que se aplicó en la presente investigación).

En el análisis bivariado se investiga la influencia de una variable que es independiente, con respecto a la variable dependiente.

En el análisis multivariado se investiga la influencia de dos o más variables independientes, junto o no a una o más variables asociadas (covariables o cofactores) sobre una o más variables dependientes.

A continuación, se relacionan los conceptos aplicados para el análisis de varianza univariado.

Suma de cuadrados total: Es la sumatoria de los cuadrados de las variables dependientes.

Suma de cuadrados del modelo: Suma de cuadrados contada por el modelo.

Suma de cuadrados residual: Suma de cuadrados no contada por el modelo (error).

Suma de cuadrados por defecto: Suma de cuadrados adicionados a la suma residual debido a la diferencia entre el modelo y los datos experimentales.

Suma de cuadrados por error verdadero: Suma de cuadrados adicionados a la suma residual que pueden deberse a error de muestreo para el número total de muestras tomadas.

Grados de libertad totales: Número total de muestras tomadas.

Grados de libertad del modelo: Número de parámetros ajustables en el modelo.

Grados de libertad residuales: Es la diferencia entre los grados de libertad totales y grados de libertad del modelo. Este es el número de grados de libertad que no son considerados por el modelo.

Grados de libertad por defecto: Los grados de libertad que podrían ser usados para agregar términos o parámetros al modelo.

Grados de libertad por error verdadero: El número de grados de libertad que son utilizados en el cálculo del error verdadero del sistema; este es igual al número de cálculos independientes del error, el cual corresponde al número de niveles de muestras que tienen réplicas independientes.

Promedio de cuadrados: Promedio de cuadrados de la variable dependiente asociada con cada grado de libertad del modelo; es igual a la suma de cuadrados del modelo dividida entre el número de grados de libertad del modelo.

Promedio de cuadrados por defecto: Promedio de cuadrados asociado con cada grado de libertad de los términos o parámetros no incluidos en el modelo.

Promedio de cuadrados por Error verdadero: promedio de cuadrados del error estimado de múltiples cálculos del error de réplicas a diferentes niveles de muestras.

Relación "F-test" del modelo: Relación entre el promedio de cuadrados del modelo y el promedio de cuadrados del error verdadero. Un buen modelo debe tener un alto promedio de cuadrados; por lo tanto, a mayor relación "F-test", mejor ajuste del modelo con los datos experimentales.

Relación "F-test" por defecto: Relación entre el promedio de cuadrados de los términos por defecto y el promedio de cuadrados del error verdadero. Un buen modelo debe tener un bajo promedio de cuadrados para los términos por defecto; por lo tanto, a menor relación "F-test" por defecto, mejor ajuste del modelo con los datos experimentales.

Relación "F-test" tabulada

Relación "F-test" del modelo: la relación F es tomada de la tabla basada en el número de grados de libertad del modelo (típicamente eje x de la tabla de la relación F) y el número de grados de libertad por el error (típicamente eje y de la tabla de la relación F).

Relación "F-test" por defecto: La relación F es tomada de la tabla basada en el número de grados de libertad de los términos por defecto (típicamente eje x de la tabla de la relación F) y el número de grados de libertad del error (típicamente eje y de la tabla de la relación F).

Significancia: Este concepto es una forma de expresar matemáticamente si dos grupos son o no diferentes dentro de una muestra o si dos variables tienen diferencias dentro de un mismo grupo y esas diferencias no son debidas a factores aleatorios. El método utilizado para hallar la significación estadística (ss), es un tipo especial de método matemático que se llama análisis estadístico. Es necesario crear una unidad de medida de ss para lo cual se usa el valor de p, al estudiar distribución de frecuencias, o el estudio de las colas de las distribuciones, o el área bajo una determinada curva, etc.

Por lo tanto p es la probabilidad de error al comparar dos o más muestras o grupos cuando aseguramos que ambos son diferentes. O sea que p es la probabilidad en el sentido de la significación estadística. Si $p < 0.05$ significa que

hay un 5% de probabilidades de error en las conclusiones, por lo cual la probabilidad de equivocación es baja.

En otras palabras, en la estadística, se dice que un evento, suceso o valor, es significativo, cuando es poco probable y por lo tanto, seguramente no se debe al azar, sino a factores específicos.

De forma más estricta, significación estadística, hace referencia a la cuestión de determinar estadísticamente, si un valor o resultado obtenido de una muestra, es poco probable, de modo que no puede explicarse por las fluctuaciones propias de esa muestra en cuestión.

R²: Es el coeficiente de determinación. Evalúa el grado de explicación o de ajuste del modelo. Si es muy próximo a 1 entonces explica muy bien el comportamiento de los datos.

Durante este trabajo se utilizó el programa computacional llamado Statistical Package for the Social Sciences "SPSS" Versión 11.0 para efectuar análisis estadísticos. Esta herramienta es muy utilizada debido a su alta versatilidad y calidad porque permite cubrir un amplio rango de procedimientos estadísticos, lo cual hace posible el procesamiento de información (cálculo de promedios, desviación estándar, etc), determinar si existen diferencias significativas entre grupos (t-test, análisis de varianza), estudiar las relaciones entre las diferentes

variables consideradas (correlación, regresión múltiple) y recibir resultados gráficos (diagramas de barras, gráficos lineales, etc).

3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.

Las muestras de los materiales para el desarrollo de la investigación, se tomaron de los materiales usados en el proyecto malla vial Cauca – Valle, ubicados en uno de los campamentos localizado en Villarrica; el ligante asfáltico procede de la refinería de Barrancabermeja. El consorcio Solarte C.S.S. Ltda. tiene la malla vial por concesión.

Estos materiales fueron caracterizados en los laboratorios de la Universidad del Cauca de acuerdo con las normas establecidas por el Instituto Nacional de Vías para verificar el cumplimiento de las respectivas especificaciones para la construcción de carreteras.

Con el fin de disminuir variables y permitir un mejor análisis que permita cumplir con los objetivos del proyecto, se diseñó una única mezcla asfáltica utilizando el método Marshall.

Se compactaron 216 briquetas, elaborando 72 muestras por cada mecanismo de compactación (presión estática, impacto y amasado); para cada método se trabajaron tres temperaturas de compactación (90 °C, 100 °C y 132 °C) y tres

energías de compactación, elaborando 8 muestras para cada combinación de temperatura y energía.

Seguidamente se efectuó el análisis volumétrico de cada una de las probetas, sumergiendo las muestras en agua, determinando el peso saturado superficialmente seco. De esta manera se calculó la densidad Bulk, porcentaje de vacíos, VMA, VFA, etc.

Para cada combinación de energía de compactación y temperatura de compactación (conjunto de 8 briquetas), se hizo lo siguiente:

Para estimar los valores extremos se tomaron las briquetas con los valores máximo y mínimo del contenido de vacíos y se ensayaron a estabilidad Marshall y flujo.

La caracterización dinámica de las muestras se realizó mediante la ejecución de ensayos de Módulos Resilientes y pruebas de Creep.

Para módulos resilientes se tomaron las tres briquetas cuyo contenido de vacíos estaba más próximo al promedio del porcentaje de vacíos (conjunto de 8 briquetas); Se estimó así el valor promedio del módulo resiliente del grupo correspondiente.

Para la realización del ensayo de módulo resiliente, se tomaron 81 briquetas en total (tres por cada condición) y se ensayaron a temperatura controlada de 20 °C, 25 °C y 30 °C.

Para la realización del ensayo Creep, se tomaron aquellas briquetas con los valores máximo y mínimo de módulo resiliente ensayados a 20°C (6 briquetas) y a 30°C (6 briquetas); igualmente de cada mecanismo de compactación se tomo una briketa con un porcentaje de compactación (%Gmm) común o típico (cercano a 95.6) con el fin de evaluar la influencia del método de compactación a una determinada densidad de las briquetas (3 briquetas).

Paralelamente con la ejecución de los ensayos de laboratorio se llevo a cabo el procesamiento de la información con el programa SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) y con base en el análisis de varianza, se controló la representatividad de las muestras y en ciertos casos hubo necesidad de desechar unas briquetas y sustituirlas.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES.

3.1.1. Ligante asfáltico. El cemento asfáltico utilizado fue suministrado por la constructora Solarte C.S.S Ltda y es procedente de la planta refinadora de Barrancabermeja; sus especificaciones y resultados de los ensayos realizados se indican en la tabla No. 2.

Tabla 2. Propiedades del ligante asfáltico

ENSAYO	MÍNIMO	MAXIMO	NORMA INV.	MUESTRA
Penetración (25°C, 100 gr,5 seg), 0.1 mm	80	100	E-706	80
Ductilidad (25°, 5 cm/min), cm	100	-	E-702	100
Pérdida por calentamiento en película delgada (163 °C, 5h), en %	-	1	E-721	0.76
Penetración al residuo asfáltico (25°C, 100 gr, 5 s) , en 1/10 mm				39
Índice de penetración	-1	1	E-724	-1.02
Peso específico,				1.0138
Viscosidad Capilar a 60 °C, poises				1082
Viscosidad Cinemática, SSF				117
Punto de ablandamiento, °C				47
Punto de ignición (corregido) copa abierta de Cleveland °C				215
Punto de llama (corregido) copa abierta de Cleveland °C				320

Ensayo de penetración al residuo del asfalto:

Tabla 3. Ensayo de penetración al residuo del asfalto

Temperatura °C	10	25	35
Penetración (1/10 mm)	9	39	110

En el anexo No. 1 se adjuntan los resultados de los ensayos de laboratorio realizados.

3.1.2. Agregados. Los materiales granulares procesados provienen de la planta asfáltica ubicada en el campamento de Villarrica (Cauca), la arena es extraída del río Cauca (sitio Chirringo), la grava es el resultado de un proceso de trituración del material del río Guachené. Se reitera que estos materiales son utilizados para la

construcción de la malla vial del Valle del Cauca y Cauca.

La procedencia de los materiales pétreos se relaciona en la tabla No. 4:

Tabla 4. Fuentes de materiales pétreos

MATERIAL	FUENTE
Grava triturada	Río Guachene
Arena triturada	Río Guachene
Arena de río	Río Cauca-Chirringo

Las especificaciones de agregados para mezcla densa en caliente (concreto asfáltico) tipo MDC-2 son las establecidas por el Instituto Nacional de vías en el artículo 450-96. Sin embargo y con propósitos investigativos, también se hace la comparación con las propiedades de los agregados con base en las especificaciones del método Superpave.

- Granulometría. Se trabajó con una sola granulometría, correspondiente a la media de la respectiva especificación, con el objeto de minimizar variables durante la realización del proyecto, la cual se detalla en la tabla No. 5.

Tabla 5. Granulometría de los agregados

Normal (mm)	Sistema alternativo	PORCENTAJE PASA			
		MATERIAL	INVIAS	SUPERPAVE	Zona Restringida
19,00	3/4"	100	100	100	
12,50	1/2"	90	80 – 100	90 - 100	
9,50	3/8"	79	70 - 88	< 90	
4,75	# 4	59.5	51 – 68	---	
2.36	# 8		---	28 - 58	39.1
2,00	# 10	45	38 – 52		---
1.18	# 16		---		25.6-31.6
0.6	# 30		---		19.1-23.1.
0,425	# 40	22.5	17 – 28		---
0.3	# 50		---		15.5
0,180	# 80	12.5	8 – 17	---	
0.15	# 150		---	---	
0,075	# 200	6	4 - 8	2 - 10	

Tal como se puede verificar en las siguientes gráficas (figuras No. 3 y No. 4), el material en estudio además de cumplir con la norma de INVIAS, también cumple con los requerimientos granulométricos del método Superpave.

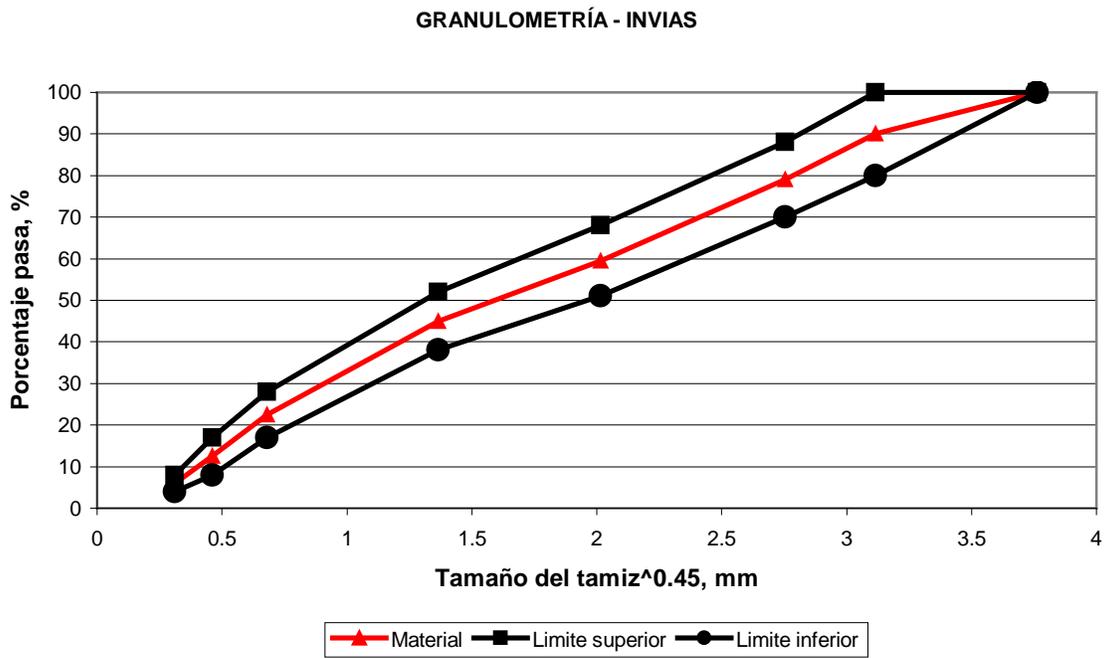


Figura 3. Granulometría - Invias

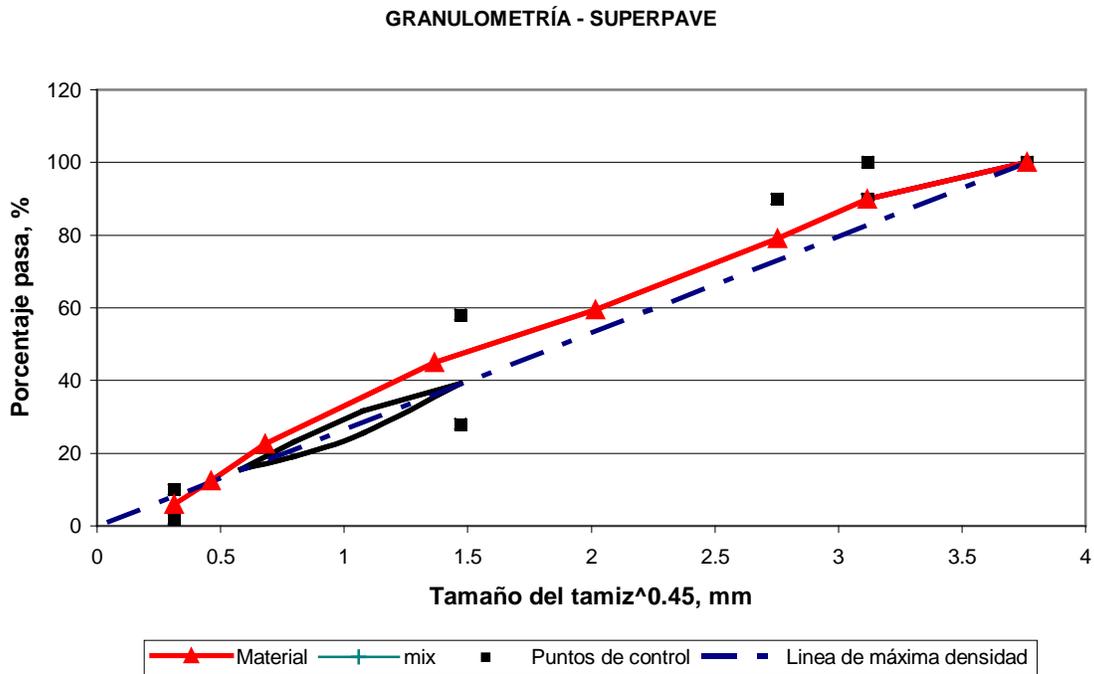


Figura 4. Granulometría - Superpave

Con el fin de obtener la gradación mencionada, se realizó en el laboratorio una

mezcla de grava triturada, arena triturada y arena de río (porcentaje en peso seco), adoptando las proporciones detalladas en la Tabla No. 6. La fracción gruesa se elaboró tomando exclusivamente la grava triturada mientras que la fracción fina se obtuvo combinando 70% de arena triturada y 30% de arena de río.

Tabla 6. Dosificación de los agregados

FRACCIÓN	% RETENIDO ESPECIFICACIÓN	GRAVA TRIT. (%)	ARENA TRIT. (%)	ARENA DE RIO (%)
3/4" - 1/2 "	10	10	0	0
1/2" - 3/8"	11	11	0	0
3/8" - # 4	19.5	19.5	0	0
# 4 - # 10	14.5	0	10.15	4.35
# 10 - # 40	22.5	0	15.75	6.75
# 40 - # 80	10	0	7	3
# 80 - # 200	6.5	0	4.55	1.95
Pasa # 200	6	0	4.2	1.8
TOTAL	100	40.5	41.65	17.85

- **Características Físicas y Mecánicas.** Con el propósito de complementar adecuadamente la caracterización física y mecánica de los agregados, fue realizada una serie de ensayos de laboratorio cuyos resultados aparecen en la siguiente tabla No. 7:

Tabla 7. Características de los agregados (inv)

CARACTERISTICA	REQUISITO	Norma INV.	MUESTRA
-----------------------	------------------	-------------------	----------------

Partículas alargadas, %	Máx.35%	E230	26
Partículas laminares, %	Máx.35%		23.9
Caras fracturadas, %	75% Min.	E227	91.8
Ensayo de durabilidad en sulfato de sodio, % pérdida total (Agregado grueso).	Máx. 12%	E220	6.9
Ensayo de durabilidad en sulfato de sodio, % pérdida total (Agregado fino).	Máx. 12%	E220	3.6
Desgaste en máquina de los Angeles, %	Máx.30	E218-19	27.8
Equivalente de arena, %	Mín.30	E133	39
Plasticidad	NP	E232	NP
Densidad Aparente del agregado grueso, gr/cc		--	2.708
Densidad Aparente del agregado fino, gr/cc		--	2.655
Peso específico relativo suelo fino, gr/cc		--	2.794
Angularidad agregado fino (río) Método A	Min.	--	44.53
Angularidad agregado fino (triturado) Método A	Min.	--	48.11

Se verificó que el agregado cumple con todos los requerimientos INVIAS.

Especificaciones Superpave.

Superpave considera angularidad del agregado grueso, angularidad del agregado fino, partículas planas, partículas alargadas y contenido de arcilla como las propiedades consensuales (hay gran aceptación sobre su uso); igualmente analiza las siguientes propiedades asociadas con la calidad de la fuente de los agregados (resistencia a la abrasión, desgaste, materiales deletéreos, granulometría).

A continuación se puede observar el cuadro comparativo entre las especificaciones de Superpave y el material de la investigación.

Tabla 8. Características de los agregados (Superpave).

CARACTERISTICA	REQUISITO	MUESTRA
Partículas alargadas, %	Máx.10%	26
Partículas laminares, %	Máx.10%	23.9
Caras fracturadas, %	100% Min.	91.8
Ensayo de durabilidad en sulfato de sodio, % pérdida total (Agregado grueso).	Máx. 10-20%	6.9
Ensayo de durabilidad en sulfato de sodio, % pérdida total (Agregado fino).	Máx. 10-20%	3.6
Desgaste en máquina de los Ángeles, %	Máx. 35-45	27.8
Equivalente de arena, %	Mín.50	39
Plasticidad	NP	NP
Densidad Aparente del agregado grueso, gr/cc		2.708
Densidad Aparente del agregado fino, gr/cc		2.655
Peso específico relativo suelo fino, gr/cc		2.794
Angularidad agregado fino (río) Método A	45% Min.	44.53
Angularidad agregado fino (triturado) Método A	45% Min.	48.11

Angularidad del agregado grueso.

Esta propiedad asegura un alto ángulo de fricción interna y resistencia al ahuellamiento; el valor requerido esta en función de nivel de tráfico esperado y de la posición dentro del pavimento.

Asumiendo un nivel de tráfico alto (≥ 100 ESALs) y una profundidad mayor de 100 mm de concreto asfáltico, el 100% de las partículas debería tener dos o más caras fracturadas (este parámetro no lo cumple el material en estudio).

Angularidad del agregado fino.

Esta propiedad garantiza un alto ángulo de fricción interna y resistencia al ahuellamiento; el valor requerido está en función de nivel de tráfico esperado y de la posición dentro del pavimento.

Considerando un nivel de tráfico alto (≥ 100 ESALs) y una profundidad mayor de 100 mm de concreto asfáltico, la norma exige un porcentaje de vacíos en el agregado fino suelto mayor que 45 % (el material en estudio satisface este criterio).

Partículas planas y alargadas.

Es el porcentaje en peso del agregado grueso que tiene una relación entre la máxima y la mínima dimensión mayor que cinco. Los valores admisibles dependen del nivel de tráfico esperado.

Suponiendo que se espera tráfico alto, el máximo porcentaje de partículas planas y alargadas admisible es de 10 % (el material en estudio no cumple este parámetro).

Contenido de arcilla.

El valor mínimo de equivalente de arena exigido es función del tráfico; suponiendo que la mezcla deberá soportar un alto nivel de tráfico, el mínimo valor admisible es de 50%. (El material pétreo en estudio no cumple esta condición).

Resistencia a la abrasión.

El máximo valor admisible de desgaste en la maquina de los Ángeles varia típicamente entre 35% y 45 %. (El agregado cumple esta especificación).

Desgaste.

El máximo valor de perdida obtenido en el ensayo de solidez fluctúa entre 10% y 20% para cinco ciclos.

Materiales deletéreos.

Se define como el porcentaje en peso de contaminantes como cúmulos de arcilla, madera, carbón, etc; corresponde al material perdido como resultado de tamizar el material con lavado. Existe un amplio rango de criterios aceptables para este parámetro, sin embargo los valores típicamente aceptados están entre 0.2% y 10%, dependiendo de la clase de contaminante.

En el anexo No. 2 se relacionan los ensayos de laboratorio que se realizaron a los agregados pétreos.

3.2. SELECCIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE ASFALTO.

Se elaboraron tres (3) briquetas para cada contenido de asfalto con el propósito de calcular peso unitario, estabilidad, flujo, contenido de vacíos, vacíos en el agregado mineral y vacíos llenos de asfalto; los resultados obtenidos se detallan a

continuación:

Tabla 9. Propiedades de la mezcla para cada contenido de asfalto

Asfalto %	Peso Unitario Lb/pie3	Estabilidad Lb	Flujo 1/100 pulg	Vacíos %	VFA %	%VMA %
5	147.1	1810	9.3	7.57	61.5	16.6
5.5	148.5	2029	10.3	5.91	67.8	16.2
6	149.2	2286	10.7	4.50	78.9	16.3
6.5	149.9	2117	12.0	3.26	85.2	16.3
7	150.3	1781	13.7	1.98	89.8	16.5
7.5	149.9	1711	17.0	1.36	94.6	17.2

Para cada contenido de asfalto se determinó la máxima gravedad específica Gmm siguiendo el método Rice. Los resultados se muestran en la gráfica No. 6.

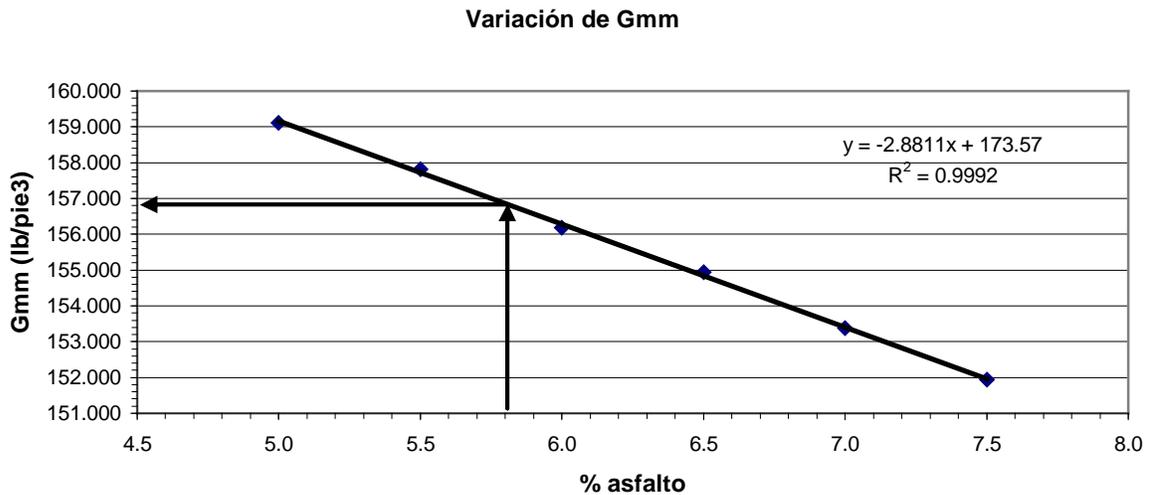


Figura 5: Variación de Gmm según el porcentaje de asfalto.

Con esta información se elaboraron las respectivas gráficas (ver anexo No. 3) y con base en estas se decidió tomar el porcentaje óptimo de asfalto igual a 5.8%.

La siguiente tabla muestra las propiedades obtenidas con dicho porcentaje de

asfalto y las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS para condiciones de tráfico pesado y carpeta de rodadura tipo MDC-2.

Tabla 10. Propiedades de la mezcla (5.8% de asfalto).

	Especificación	Mezcla
Estabilidad Lb	> 1800	2240
Flujo 1/100 pulg	8 - 14	10.2
Vacíos %	4 - 6	5
VMA %	> 15	16.23
VFA %	75 - 80	75

El valor de Gmm = 156.87 lb/pie³ que corresponde a mezcla con 5.8% de asfalto, se tomó como referencia para el cálculo del porcentaje de compactación (%Gmm).

De acuerdo con el diseño de la mezcla asfáltica con el método Marshall, se obtuvo la siguiente composición volumétrica:

Volumen de asfalto = 11.34%

Volumen de agregados = 83.66%

Volumen de vacíos = 5.0%

Esta dosificación se utilizó para elaborar todas las briquetas de 100 mm (4") de diámetro con los diferentes equipos de compactación de laboratorio (Prensa hidráulica, equipo Marshall y compactador giratorio).

3.3. COMPACTACIÓN DE BRIQUETAS.

Para cada mecanismo de compactación se consideraron tres temperaturas de compactación (90°C, 110°C y 132°C); estas se determinaron con base en los siguientes criterios:

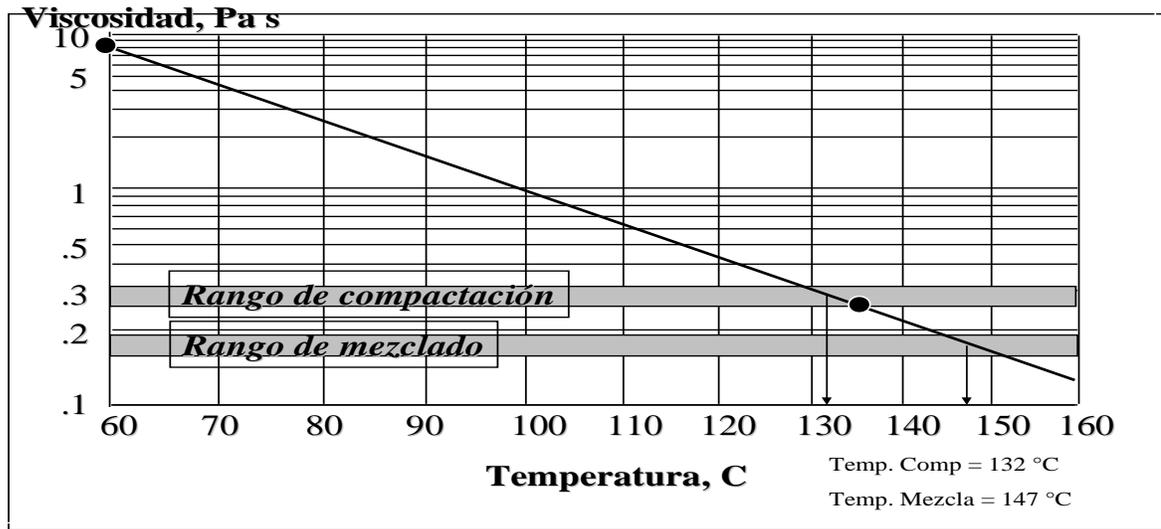
132°C: Temperatura optima de compactación de la mezcla, obtenida de acuerdo con el nomograma de Heukelom – Susceptibilidad a la temperatura de la mezcla; como se ilustra en la figura No. 6. (Metodología sugerida por las especificaciones de construcción INVIAS).

90°C: Mínima temperatura de compactación de mezcla, se decidió considerar este valor porque es muy próximo al límite inferior de la temperatura para lograr una compactación efectiva. Vale la pena mencionar que por diversos factores extremos, es posible encontrar estas temperaturas de compactación y por ello se considera importante analizar este caso.

110°C: Valor promedio.

Figura 6. Nomograma de Heukelom.

Temperatura de mezclado y compactación.



Con el propósito de analizar la relación entre la viscosidad de manejo de las mezclas asfálticas, la energía de compactación aplicada y el método de compactación; a continuación se muestra la equivalencia entre temperatura y viscosidad del cemento asfáltico utilizado.

Tabla 11. Relación temperatura - viscosidad de la mezcla

TEMPERATURA(°C)	VISCOSIDAD (poises)
90	50
110	10
132	2.7

Todas las briquetas (216) se compactaron en moldes de 100 mm de diámetro:

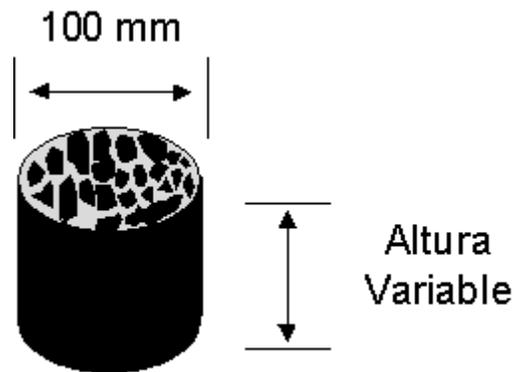


Figura 7. Detalle de una briketa de ensayo típica.

Tal como se menciono anteriormente, las energías de compactación utilizadas para los diferentes mecanismos se hizo tomando como referencia los valores estándar de los métodos Superpave y Marshall, así como el contenido de vacíos calculado para las briquetas. A continuación se explica detalladamente como hizo la determinación de los niveles de energía de compactación aplicados en cada método de compactación.

3.3.1. Compactación por presión estática. Se empleó el equipo perteneciente a la Universidad del Cauca (máquina universal) y se siguió el procedimiento del ensayo de inmersión compresión de mezclas asfálticas. Se usaron moldes perforados de 100 mm (4") de diámetro. La velocidad de aplicación de carga fue de 1.3 mm/min (0.05"/min) por cada 25 mm (1") de altura de la probeta.

La determinación de las presiones estáticas a aplicar se hizo de la siguiente manera:

Se elaboraron dos briquetas aplicando 210 Kg/cm² (presión especificada para el ensayo de inmersión – compresión) y se encontró que su contenido de vacíos es cercano a 7%; posteriormente se compactaron dos probetas para 150, 200, 250, 300, 350, 450 y 600 Kg/cm², determinado el respectivo contenido de vacíos y de esta manera se obtuvo la siguiente gráfica:

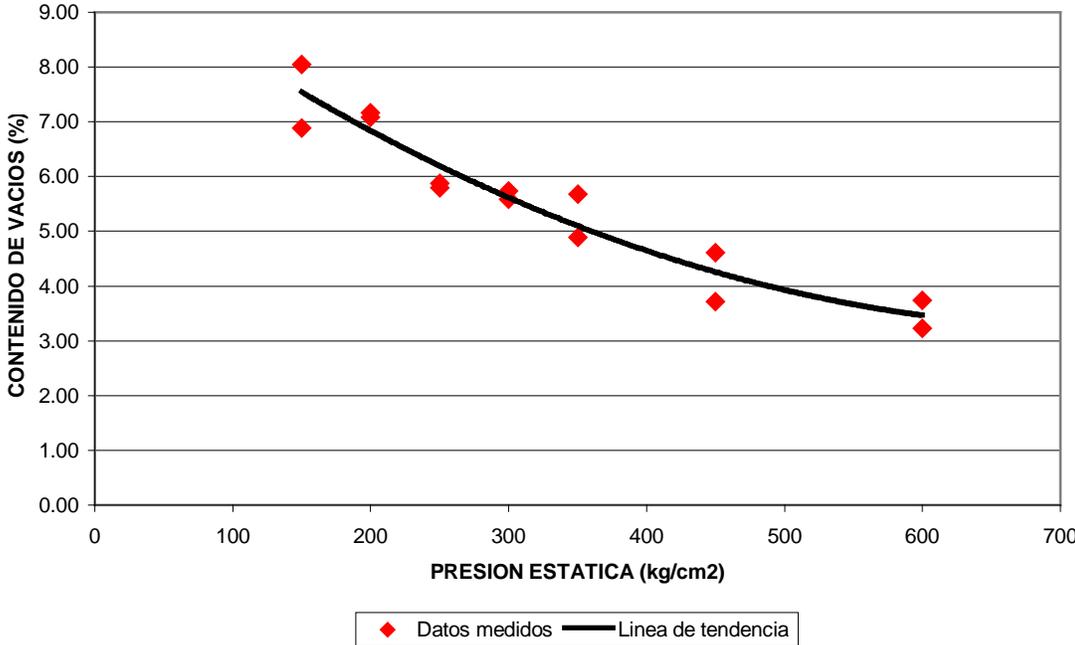


Figura 8. Curva de Calibración de presión estática.

Entonces se decidió trabajar con 210 Kg/cm² (presión de referencia), 450 Kg/cm² (4% de vacíos, valor sugerido por las especificaciones) y 325 Kg/cm² (valor intermedio).

En total se realizaron setenta y dos (72) briquetas, trabajando con las tres presiones estáticas de compactación (210 Kg/cm², 325 Kg/cm², 450 Kg/cm²) y las tres temperaturas de compactación (90°C, 110°C y 132°C); se fabricaron ocho (8) muestras para cada condición de energía de compactación y temperatura de compactación, tal como se indica en la tabla No. 12:

Tabla 12. Compactación briquetas a presión estática

TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PRESION ESTATICA (Kg/cm ²)	CANTIDAD DE BRIQUETAS
90	210	8
	325	8
	450	8
110	210	8
	325	8
	450	8
132	210	8
	325	8
	450	8
TOTAL		72

3.3.2. Compactación por impacto. Para elaborar estas muestras se usó el equipo Marshall mecánico de la Universidad del Cauca; el cual consta del martillo estándar de 10 lbs y 18 pulgadas de caída, un molde de 100 mm (4”).

Las energías de compactación fueron definidas teniendo en cuenta la recomendación de compactación propia del método Marshall, de acuerdo al nivel de tráfico esperado (ver tabla No. 1).

En total se realizaron setenta y dos (72) briquetas, tomando las tres energías de compactación (35, 50, 75 golpes / cara) y las tres temperaturas de compactación (90°C, 110°C y 132°C); se fabricaron ocho (8) muestras para cada condición de energía de compactación y temperatura de compactación.

Tabla 13. Compactación briquetas por impacto

TEMPERATURA DE COMPACTACION (C)	GOLPES POR CARA	CANTIDAD DE BRIQUETAS
90	35	8
	50	8
	75	8
110	35	8
	50	8
	75	8
132	35	8
	50	8
	75	8
	TOTAL	72

3.3.3. Compactación por amasado. Para elaborar las muestras se usó el compactador giratorio Troxler 4140 de la Universidad del Cauca; este equipo permite elaborar muestras de 150 mm (6") o 100 mm (4") mediante la aplicación simultanea de presión estática y fuerzas cortantes por la rotación del cabezal de carga sobre la muestra. Para el desarrollo de este trabajo se adoptó el uso del molde de 100 mm (4"), se aplicó una velocidad angular de 30 giros por minuto para un total de 197 giros y el ángulo de giro fue ajustado en 1.25°.

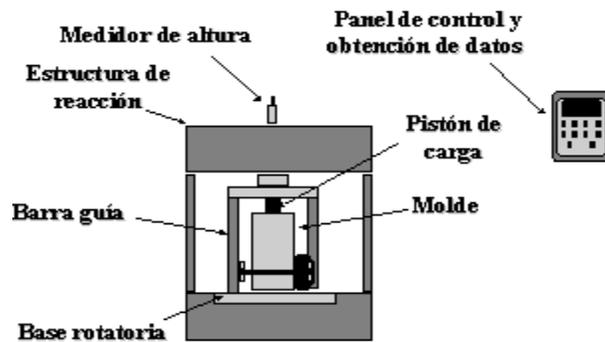


Figura 9. Compactador giratorio de Superpave

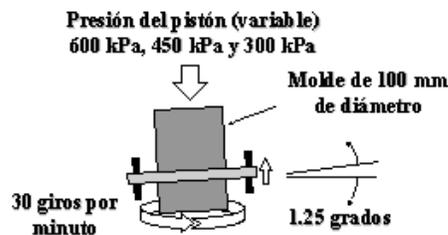


Figura 10. Molde del compactador giratorio y parámetros de Compactación.

Inicialmente se decidió elaborar briquetas aplicando una presión de 600 Kpa, la cual es sugerida de acuerdo con la metodología de diseño de pavimentos Superpave, luego se adoptaron las presiones de 450 Kpa y 300 Kpa con el propósito de analizar la variación en el contenido de vacíos cuando la mezcla es compactada aplicando energías de compactación menores.

En total se elaboraron setenta y dos (72) briquetas, considerando las tres presiones

de compactación (300 Kpa, 450 Kpa, 600 Kpa) y las tres temperaturas de compactación (90°C, 110°C y 132°C); se fabricaron ocho (8) probetas para cada combinación de energía de compactación y temperatura de compactación, tal como lo indica la tabla No.14.

Tabla 14. Compactación briquetas por amasado

TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (°C)	PRESION (Kpa)	CANTIDAD DE BRIQUETAS
90	300	8
	450	8
	600	8
110	350	8
	400	8
	600	8
132	350	8
	450	8
	600	8
	TOTAL	72

3.4. CÁLCULO DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS.

La densidad Bulk se determinó después de realizar el peso de la muestra en el aire, peso en el agua y peso saturado con superficie seca, siguiendo el procedimiento detallado en ASTM D 2726.

3.4.1. Análisis de densidad – vacíos. Las propiedades que se determinan en el análisis densidad – vacíos de una probeta de mezcla asfáltica compactada son:

Densidad de la probeta compactada.

Vacíos del agregado mineral.

Vacíos en la mezcla compactada.

El detalle de la elaboración y composición volumétrica de todas y cada de las briquetas se puede observar en el anexo No. 4

3.5. ENSAYOS DINÁMICOS.

La etapa de caracterización dinámica de la mezcla asfáltica se llevó a cabo en las instalaciones del laboratorio de la Universidad Nacional sede Manizales.

3.5.1. Módulo resiliente. El ensayo consiste en un conteo fijo de cinco pulsos de carga, durante los cuales el sistema automáticamente ajusta la magnitud de la fuerza para lograr la deformación unitaria diametral especificada por el operador.

Por cada cinco pulsos de carga, son obtenidos los siguientes resultados:

Módulo de rigidez del ensayo.

Módulo de rigidez ajustado por temperatura y relación de área cargada.

Tiempo de carga del pulso de fuerza, medido en fuerza cero.

Fuerza de carga máxima.

Deformación unitaria diametral horizontal transitoria máxima del espécimen.

Factor del área de carga.

Con base en esta información para los cinco pulsos de carga, se calcula la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Los ensayos se realizaron a temperatura controlada de 20 °C, 25 °C y 30 °C; las temperaturas de la superficie de los especímenes y dentro del núcleo, son estimadas por transductores insertados en una muestra de control localizada cerca del espécimen de ensayo.

En el anexo No. 5, se adjuntan los resultados que el equipo entrega como datos de salida de la elaboración del ensayo a una muestra en particular. A continuación se presentan dicha información en una manera más consolidada:

Tabla 15. Ensayo de módulo resiliente de una muestra

Temperatura de ensayo = 20 °C

No.	Espesor	Temp. °C		Rigidez MPa (Mean)	Desviación estándar	Coeficiente De variación	Observación	Temperatura Prom. °C	Rigidez Promedio (MPa)
		Ext.	Int.						
9M	64,3	20,1	20,1	6030	111,90	1,856	Sin girar	20,125	5866
9M		20,2	20,1	5702	126,90	2,226	Girada a 90°		

En el anexo No. 6 se adjunta el cuadro resumen de los ensayos de módulo resiliente realizado a cada una de las briquetas y para las diferentes temperaturas de ensayo.

3.5.2. Deformación permanente (creep). Se requiere un acondicionamiento de la muestra antes que la deformación recuperable sea registrada; dicho acondicionamiento se puede efectuar aplicando repeticiones de carga al espécimen sin impacto durante un período mínimo suficiente para tener una lectura de deformación uniforme. Entonces, inicialmente se aplica un esfuerzo estático de acondicionamiento a la muestra y se mide el esfuerzo acumulado resultante. La magnitud y duración de la aplicación del esfuerzo de acondicionamiento tienen valores por defecto de 10 Kpa y 600 segundos, respectivamente, pero esos valores pueden ser alterados si se requiere.

Luego del periodo de acondicionamiento, se programa un tiempo fijo de espera de 20 segundos, lapso en el cual el esfuerzo aplicado es cero. Cuando este tiempo termina, la muestra es sometida a pulsos repetidos de carga durante 1800 ciclos con un nivel de esfuerzos constante que por defecto es de 100 Kpa. Al igual que los parámetros del acondicionamiento, la magnitud del esfuerzo por defecto y el número de ciclos aplicados pueden ser modificados si se requiere. Durante la aplicación de los pulsos de carga, es medida la deformación unitaria acumulada y se grafica con ejes en escala lineal.

La deformación del espécimen durante los estados de acondicionamiento y pulsos de carga del ensayo, se miden en el mismo eje que el esfuerzo aplicado, usando dos Transformadores de desplazamiento lineal variable LVDT. La fuerza aplicada es de ciclo abierto controlado, de forma rectangular básicamente.

Los siguientes datos se calculan para cada pulso y son mostrados en pantalla:

Duración del ensayo (horas, minutos y segundos)

Conteo del pulso de carga

Esfuerzo máximo de carga.

Deformación unitaria acumulada en la muestra, durante el estado de pulso de carga.

Conteo de pulso entre 10000 y 30000 micro deformaciones acumuladas.

Pendiente de la deformación unitaria acumulada.

Deformación unitaria resiliente y módulo resiliente.

Módulo de rigidez al flujo del espécimen.

Temperatura del núcleo y superficie del espécimen.

Señal de los LVDT, mostrados como un porcentaje de su escala total.

Esfuerzo de acondicionamiento aplicado.

Deformación unitaria acumulada durante la etapa de acondicionamiento.

Duración del estado de acondicionamiento.

Finalmente, para caracterizar el material visco elástico, se calcula la ecuación de creep en función del tiempo.

$$D(t) = \varepsilon(t) / \sigma$$

Donde:

$D(t)$ = Ecuación de creep, dependiente del tiempo

$\varepsilon(t)$ = deformación unitaria en función del tiempo

σ = esfuerzo aplicado; todas las briquetas fueron ensayadas aplicando un esfuerzo promedio de 100 Kpa.

En el anexo No. 7, se presentan los resultados que el equipo UTM entrega una vez se ha realizado el ensayo.

De acuerdo con las graficas deformación versus tiempo obtenidas de los ensayos (anexo No. 8), se verifico que el modelo potencial es el que permite un mejor ajuste a los datos y es el tipo de correlación más representativo para este tipo de pruebas.

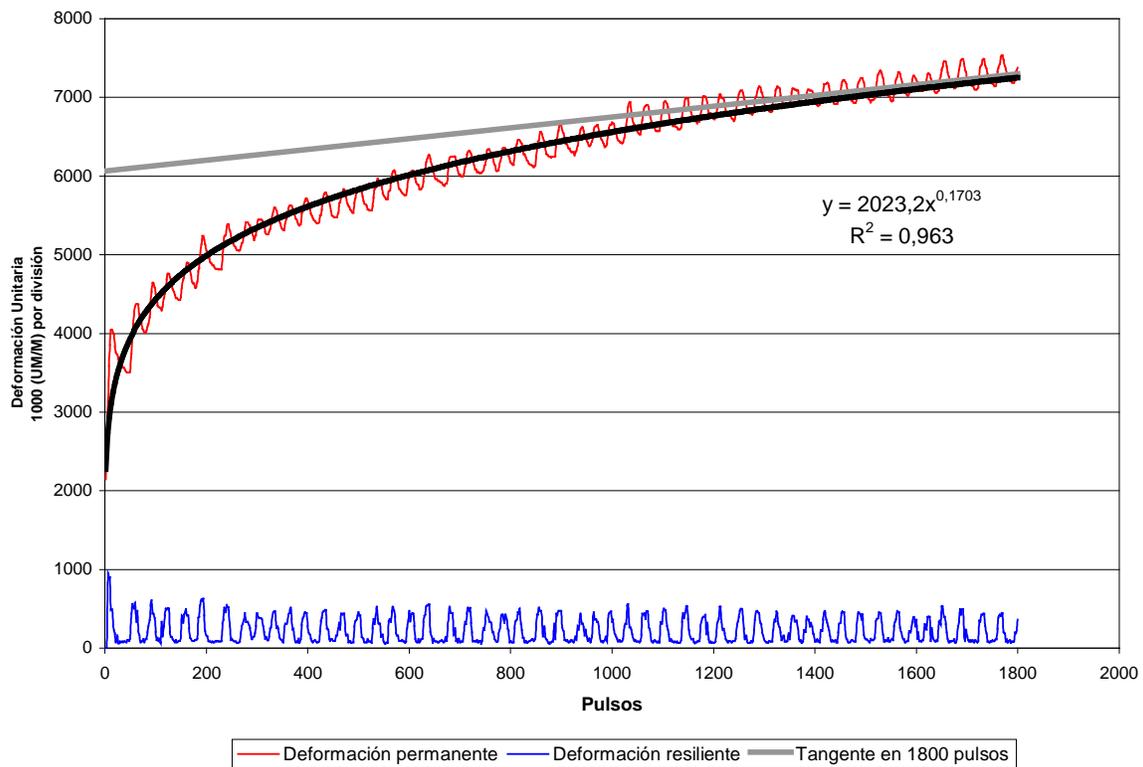


Figura 11. Curva de deformación vs. Tiempo de una muestra.

A manera de ejemplo, en la figura anterior se muestra la curva deformación contra tiempo para una muestra compactada con el equipo Marshall.

De esta manera se obtuvieron expresiones de la forma:

$$\varepsilon = D1 (t) ^ m$$

D1 y m (valores constantes), son los parámetros que rigen el crecimiento del Creep.

Posteriormente, con el fin de calcular dicho comportamiento, se determinó la pendiente de la curva (tangente a la curva a los 1800 pulsos), derivando la ecuación anterior.

Por lo tanto:

$$d(\epsilon)/dt = m * D1 * (t_{1800}) ^ (m-1)$$

Este valor se debe calcular cuando termina el ensayo ($t = 1800$ ciclos), con el fin de considerar únicamente la componente viscosa del material (deformación permanente); así $d(\epsilon)/dt$ es constante para cada briqueta.

El intercepto de la pendiente con el eje Y (deformación unitaria), marca el punto (D_0) donde comienza a presentarse deformación permanente, (Si $D > D_0$, es deformación permanente; pero si $D < D_0$, es deformación elástica la cual puede ser instantánea o retardada).

A continuación se indica el criterio de selección y la relación de briquetas a las cuales se les realizó el ensayo Creep:

Tabla 16. Relación de briquetas – ensayo creep

CONDICION QUE CONTROLA	No. BRIQUETA	% Gmm	MÓDULO RESILIENTE (Mpa)
VALOR MÁXIMO DE MODULO, Temp. de ensayo = 20C	5G	95,761	6286
	9M	94,911	5866
	72P	95,511	5140
VALOR MINIMO DE MODULO, Temp. de ensayo = 20C	36G	96,580	3943
	31M	90,490	2809
	8P	92,804	2393
VALOR MÁXIMO DE MODULO, Temp. de ensayo = 30C	5G	95,761	1953
	41M	94,120	1591
	58P	95,162	1682
VALOR MINIMO DE MODULO, Temp. de ensayo = 30C	7G	95,867	1265
	5M	90,596	609
	8P	92,804	709
IGUAL GRADO DE COMPACTACION, %Gmm ≈ 95.6	5G	95,761	6286 (T.e.= 20°C)
	17M	95,684	5424 (T.e.= 20°C)
	51P	95,532	3935 (T.e.= 20°C)

- **Cálculo del ahuellamiento.** Como se mencionó anteriormente, la prueba de creep no solo permite obtener las ecuaciones de creep para diferentes tiempos como una variable de entrada para realizar análisis de sistemas viscoelásticos, sino que también sirve para estimar la profundidad de la huella causada por la deformación permanente de la capa asfáltica.

Van de Loo desarrolló un método para estimar la profundidad de la huella, el cual fue incorporado en el manual de diseño Shell; la profundidad del ahuellamiento se calcula como sigue:

$$\text{Profundidad huella} = C_m * h_1 * (\sigma_{\text{PROMEDIO}}) / (S_{\text{MEZCLA}})$$

Donde:

C_m = Factor de corrección = 1

h_1 = Espesor de la capa de asfalto

σ_{PROMEDIO} = esfuerzo vertical promedio en la capa de asfalto.

S_{MEZCLA} = Módulo Resiliente de la mezcla determinado directamente con base en los resultados de la prueba de creep.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

El análisis estadístico se realizó con base en el paquete computacional especializado denominado Statistical Package for the Social Sciences Versión. 11.0 "SPSS". El uso de este programa permitió efectuar análisis gráfico de comparación (Diagrama de caja y alambres o diagramas de Tukey).

Este tipo de esquema incluye la mediana, los percentiles 25 y 75 y una serie de valores atípicos que proporcionan completa información sobre, entre otras cosas, el grado de dispersión de los datos y el grado de asimetría de la distribución.

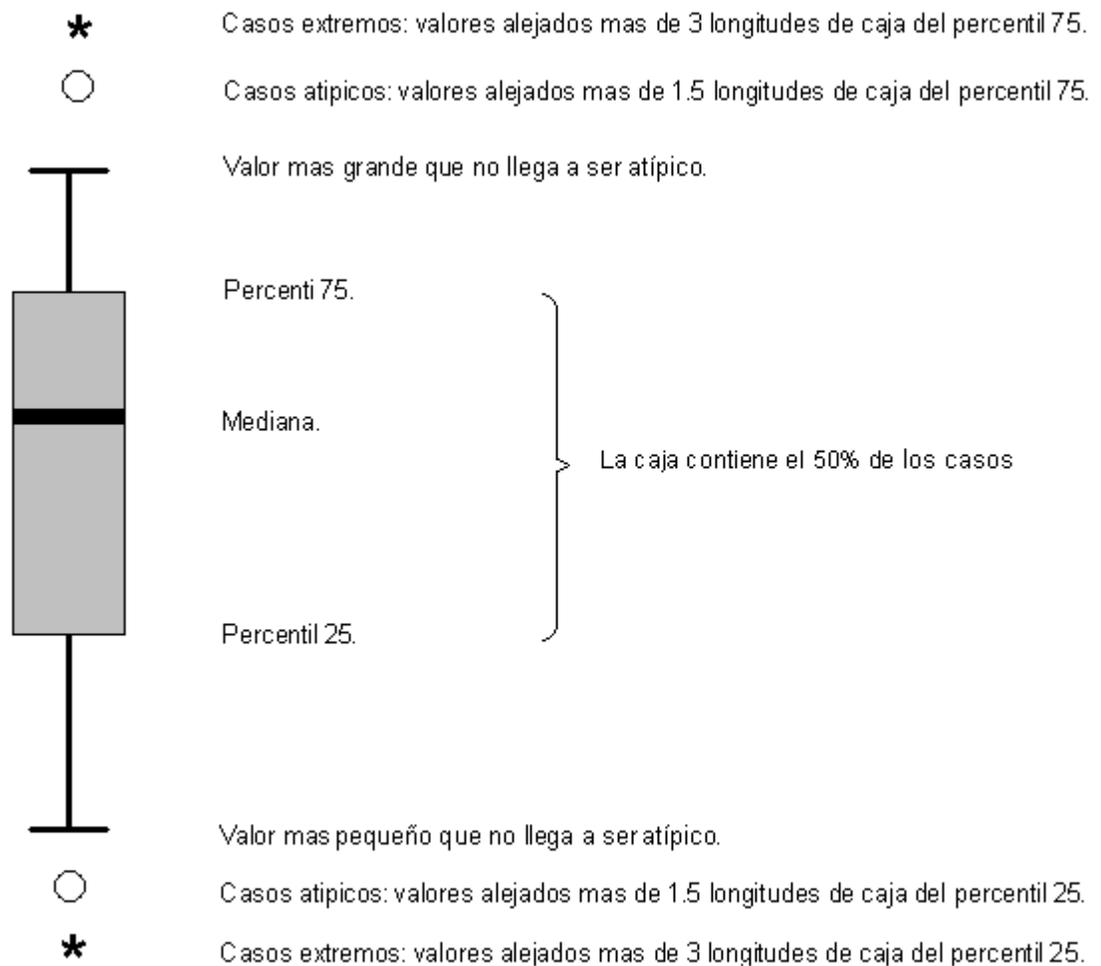


Figura 12. Diagrama de Tukey

Inicialmente, la base de datos comprende las 216 briquetas, pero posteriormente, esta base se restringe de acuerdo al ensayo o “variable dependiente” analizada.

Para analizar el porcentaje de compactación (%Gmm), se consideró toda la base de datos (216 briquetas), y las variables independientes fueron (energía, temperatura, energía y temperatura) además del modelo y el error (suma residual).

Para analizar el módulo resiliente la base de datos es de 81 briquetas y las variables independientes igualmente son (energía, temperatura, energía y temperatura); el modelo y el error (suma residual).

4. ANALISIS DE RESULTADOS.

De acuerdo con el reporte NCAT National Asphalt Pavement Association No. 2000-02, se considera que ciertas mezclas asfálticas son inestables (no permiten una adecuada compactación en la vía) en un rango de temperaturas de compactación entre 82°C y 115°C.

Con base en la experiencia adquirida en Estados Unidos para la compactación de mezclas Superpave, se encontró que aproximadamente el 40% de las mezclas de gradación gruesa (abajo de la zona restringida) son mezclas inestables. Los materiales pétreos utilizados en esta investigación son de gradación fina (encima de la zona restringida) y por ello no se esperan problemas de inestabilidad.

En este capítulo se realiza el análisis de cada método de compactación y de la Inter.-relación que se ha encontrado con las variables energía y temperatura de compactación y su efecto en las propiedades de la mezcla

4.1. COMPACTACIÓN POR PRESIÓN ESTÁTICA.

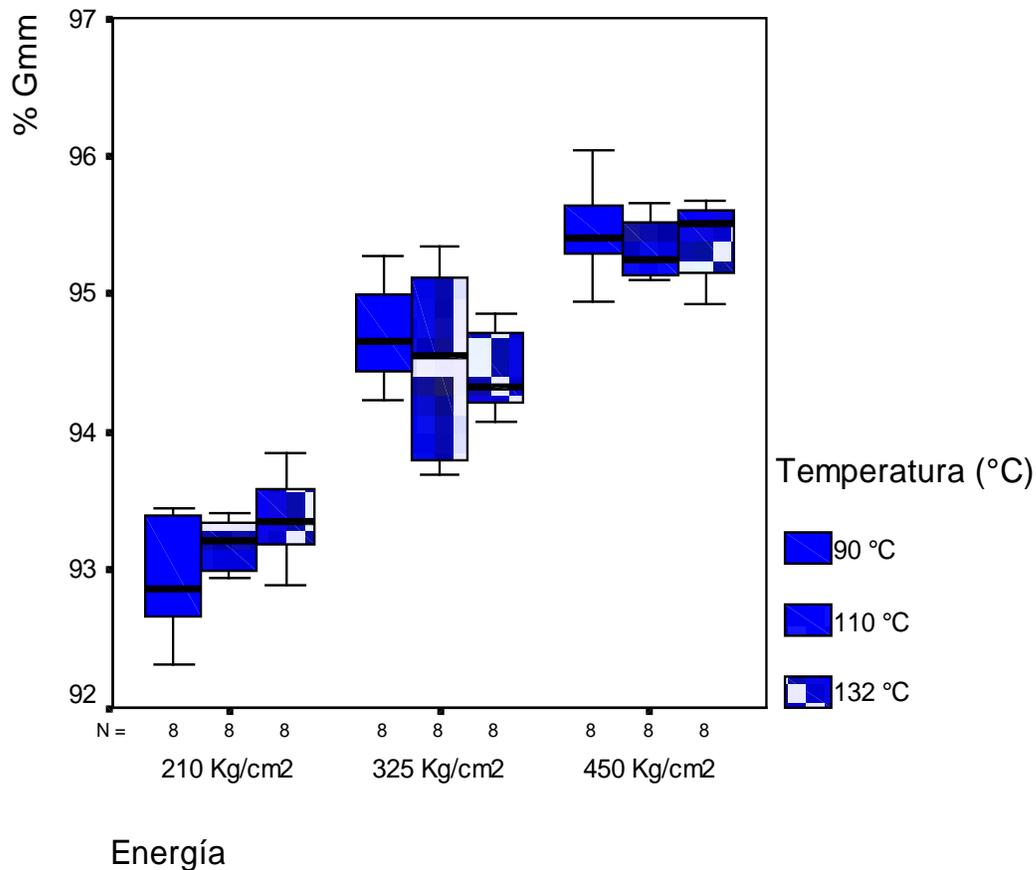
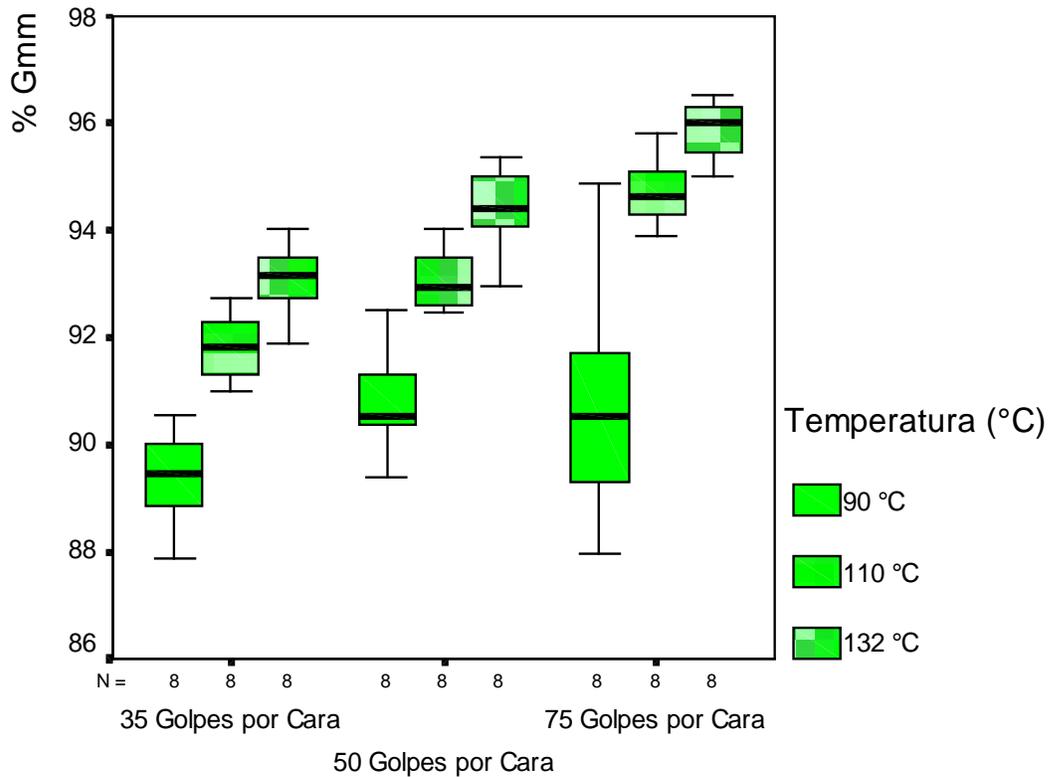


Figura 13. Análisis gráfico compactación por presión.

Tal como lo corrobora la gráfica, bajo la aplicación de una presión estática constante, este tipo de compactación es efectiva únicamente hasta cuando el esqueleto mineral lo permite; Debido a que no hay posibilidad de reacomodo de partículas.

Claramente se puede apreciar que la variable que controla el proceso es la presión estática aplicada; en consecuencia, la influencia de la temperatura de compactación es mínima.

4.2. COMPACTACIÓN POR IMPACTO



Energía

Figura 14. Análisis Gráfico Compactación por impacto.

En este mecanismo, tanto la energía como la temperatura de compactación son factores decisivos. Esto se puede explicar teniendo en cuenta el gran efecto (favorable o desfavorable) que puede ejercer el ligante asfáltico sobre el movimiento relativo entre los agregados minerales y por lo tanto en el porcentaje de compactación (%Gmm) obtenido.

Tal como se mencionó anteriormente, el asfalto es un material visco elástico y por ello su resistencia al flujo es dependiente de la temperatura de compactación de la mezcla. A temperaturas bajas, el asfalto es más viscoso y por ello se dificulta la

reorientación de partículas reduciendo la eficiencia en el proceso de densificación de la mezcla, mientras que al incrementarse la temperatura, se alcanzan mayores grados de compactación. Otro factor que afecta este proceso es el fracturamiento de los agregados.

Igualmente se observa que para temperaturas de compactación muy bajas (90°C), debido a la alta viscosidad del asfalto, siempre se obtienen bajos grados de compactación (89% - 91%), independientemente de la energía (numero de golpes por cara) aplicada. Es decir, a temperaturas bajas, la viscosidad del ligante asfáltico controla el proceso.

Mientras que para temperaturas intermedias y altas (110°C y 132°C), la energía de compactación aplicada es el factor que gobierna el fenómeno.

4.3. COMPACTACIÓN POR AMASADO.

Es importante reiterar que este mecanismo es el que mejor representa la compactación de concretos asfálticos en la vía y por ello es usado en el método Superpave para diseño de mezclas; en consecuencia el análisis de este mecanismo tiene relación directa con la compactación en el campo.

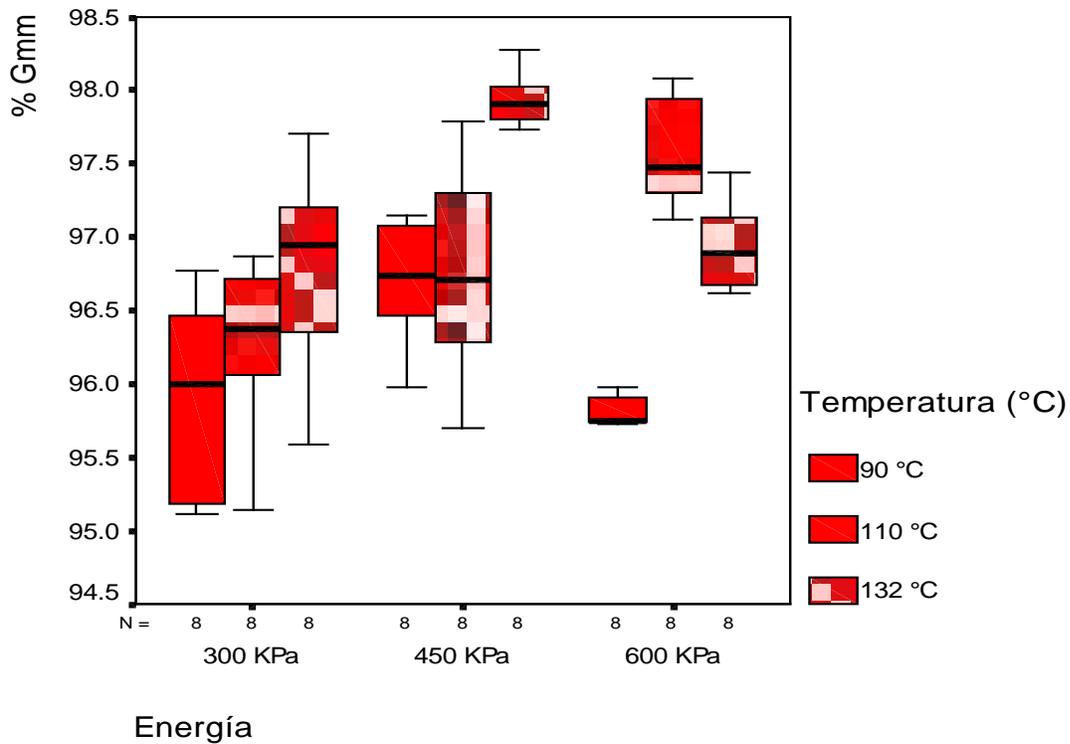


Figura 15. Análisis Gráfico Compactación por amasado.

Con base en los resultados obtenidos en la fase experimental, se puede observar un comportamiento muy interesante manifestado en la siguiente TENDENCIA:

Para una temperatura de compactación constante, existe una energía de compactación óptima (similar a la relación humedad – energía de compactación en el proceso de densificación de suelos). En otras palabras, a una temperatura de compactación constante, parece que no necesariamente a mayor energía de compactación, se logra mayor densificación porque se encontraron ciertos casos en los cuales, por el contrario, al incrementar la energía de compactación, se redujo el porcentaje de compactación (%Gmm) de la mezcla.

Teniendo en cuenta el efecto de amasado (reacomodo de partículas) y que durante este trabajo la variación de la energía de compactación en el compactador giratorio se hizo cambiando la presión ejercida sobre el molde y manteniendo las demás variables constantes, una posible explicación del comportamiento hallado es la siguiente:

Al tener temperatura de compactación constante, la viscosidad del asfalto también es constante y por lo tanto la densidad final de la mezcla es fuertemente influenciada por comportamiento del esqueleto mineral de la mezcla.

Desde este punto de vista, se puede inferir que a presiones bajas no es posible lograr los mayores grados de compactación debido a que la presión aplicada no es suficiente para permitir un adecuado arreglo de los agregados; al incrementar la presión y considerando la reorientación de partículas, se espera un aumento en la densidad del concreto asfáltico hasta lograr la máxima densificación posible. Pero si se aplican muy altas presiones, se puede reducir la efectividad del proceso porque la presión actuante limita en cierta forma la posibilidad de que los agregados se muevan entre sí.

Adicionalmente, para este mecanismo de compactación se obtuvo la variación de la altura de la muestra versus el número de giros el cual se detalla en el cuadro resumen del anexo No. 9.

De igual manera, en este anexo No. 10 se presenta el comportamiento del porcentaje de compactación (%Gmm) al variar el número de giros. Inicialmente se presenta la gráfica en escala aritmética y posteriormente se presenta en escala logarítmica.

Para poder realizar esta gráfica se calculó el factor de corrección, el cual permite correlacionar la densidad de la briqueta calculada con base en la altura de la muestra registrada en el compactador giratorio y la densidad Bulk de la muestra medida en el laboratorio, como sigue:

Factor de corrección = Densidad Bulk medida / Densidad calculada.

En este trabajo se encontró que el factor de corrección promedio de las 72 probetas ensayadas en el laboratorio de la Universidad del Cauca es igual a 1.04348.

El parámetro $N_{inicial}$ es calculado con base en $N_{diseño}$, $N_{inicial}$ representa la respuesta de la mezcla durante la compactación inicial durante la construcción y es considerado como una medida de la compactabilidad de la muestra. Una alta densidad a $N_{inicial}$ es considerada generalmente indeseable porque es posible que la mezcla se pudiera compactar muy fácilmente y así puede ser susceptible al ahuellamiento (aunque unas investigaciones indican que esto no es siempre cierto).

N máximo es el número de giros requeridos para producir una densidad en el laboratorio que nunca debería ser excedida en la vía. Una alta densidad a N máximo también es considerada indeseable porque N máximo representa un nivel de tráfico mucho más alto que el tránsito de diseño. Limitando la densidad a N máximo, se espera que la mezcla no se densificara a contenidos de vacíos extremadamente bajos si se presenta tráfico alto no esperado.

En esta investigación:

$$N_{\max} = 197 \text{ giros}$$

$$\log N_{\max} = 1.10 \log N_{\text{dis}}$$

$$\log 197 = 1.10 * \log N_{\text{dis}}$$

$$2.0859 = \log N_{\text{dis}}$$

$$N_{\text{diseño}} = 122$$

ESAL 10 a 30 millones.

39 °C – 40 °C Temperatura promedio del aire para diseño.

$$\log N_{\text{ini}} = 0.45 \log N_{\text{dis}}$$

$$\log N_{\text{ini}} = 0.45 * \log 122$$

$$\log N_{\text{ini}} = 0.9389 \quad \text{entonces, } N_{\text{inicial}} = 9$$

El método Superpave para el diseño de pavimentos recomienda que la mezcla tenga 4 % de vacíos para $N_{\text{diseño}}$, independientemente del tráfico esperado. Un concreto asfáltico que tiene un contenido de vacíos igual a 4% a $N_{\text{diseño}}$ debería

tener al menos 11 % de vacíos a $N_{inicial}$. Las mezclas que no cumplen este criterio son mezclas finas y frecuentemente tienden a tener una gran cantidad de arena natural.

En la figura No. 16 se comparan de los grados de compactación obtenidos (600 Mpa, 90 °C). contra los grados de compactación recomendados por el método Superpave (Porcentaje de compactación (%Gmm) para $N_{inicial}$ y N_{max}).

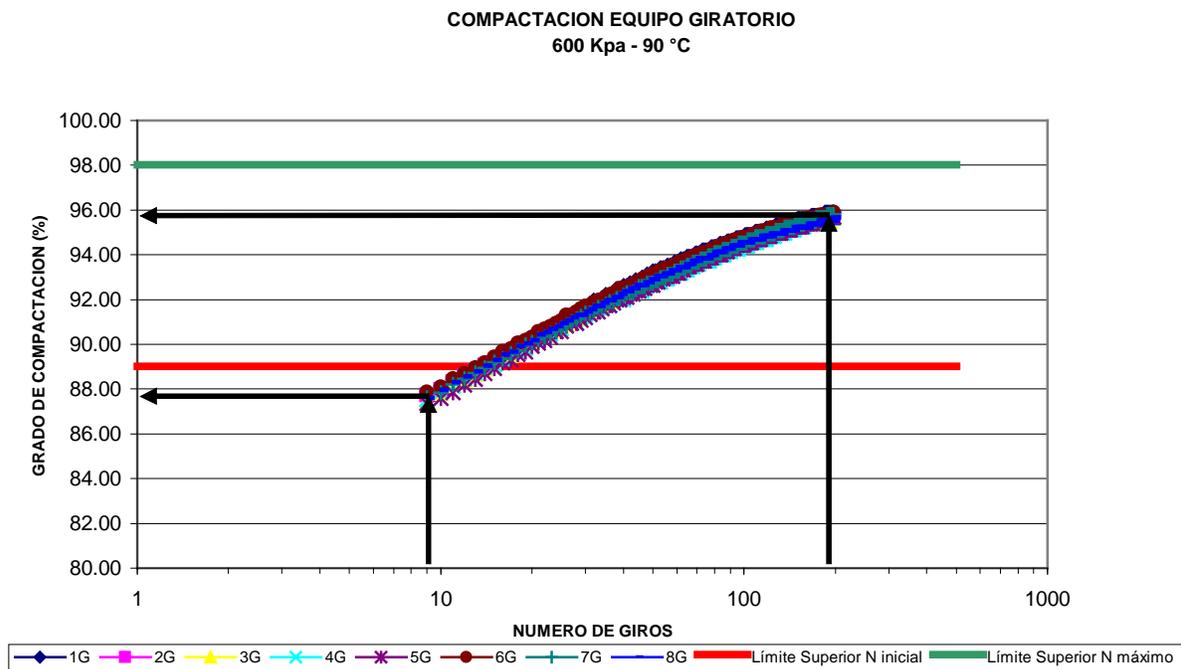


Figura 16. Evaluación de $N_{inicial}$ y $N_{máximo}$.

La anterior gráfica es la base para determinar el contenido de asfalto óptimo de acuerdo al método Superpave.

En el anexo No. 11, se puede observar gráficamente la variación del porcentaje de

compactación (%Gmm) teniendo en cuenta el método, energía y temperatura de compactación.

4.4. COMPARACIÓN ENTRE METODOS DE COMPACTACIÓN.

Con base en los resultados obtenidos en esta investigación, la compactación con el equipo giratorio es la más eficiente, la compactación por impacto corresponde a un nivel intermedio y la compactación por presión estática es la menos eficiente.

Igualmente, la dispersión del porcentaje de compactación (%Gmm) fue similar para la compactación con el equipo giratorio y para presión estática pero fue mayor para compactación por impacto.

COMPACTACIÓN MARSHALL

El porcentaje de compactación (%Gmm) varía entre 88% y 96%, lo cual demuestra la alta variabilidad propia del método. La máxima dispersión del porcentaje de compactación (%Gmm) fue obtenida para las muestras compactadas a 90°C.

Par una temperatura de compactación constante; a mayor energía de compactación, mayor porcentaje de compactación (%Gmm). De igual manera, para una energía de compactación constante, a mayor temperatura de compactación, mayor %Gmm.

COMPACTADOR GIRATORIO

El porcentaje de compactación (%Gmm) fluctúa entre 95% y 98.5%, lo cual comprueba la baja variabilidad del método.

Ciertas briquetas compactadas a 90 °C y a 450 Kpa presentaron mayor porcentaje de compactación (%Gmm) que otras briquetas compactadas a la misma temperatura, pero a 600 Kpa.

A 110 °C, a mayor energía de compactación, mayor porcentaje de compactación (%Gmm).

A 132 °C y 450 Kpa, se obtuvieron los mayores grados de compactación y la menor dispersión.

Cuando la temperatura de compactación es 90 °C, si la energía de compactación se incrementa, habrá menor dispersión.

A 300 Kpa los máximos valores de porcentaje de compactación (%Gmm) fueron obtenidos a 132°C.

A 450 Kpa los máximos valores de porcentaje de compactación (%Gmm) fueron obtenidos a 132°C.

A 600 Kpa los máximos valores de porcentaje de compactación (%Gmm) fueron obtenidos a 110°C.

COMPACTADOR POR PRESION

Se tienen grados de compactación entre 92% y 96% y por ello no se tiene alta variabilidad.

A presión constante, la temperatura de compactación de las briquetas ejerce un efecto mínimo sobre el porcentaje de compactación (%Gmm).

A temperatura de compactación constante; a mayor presión, mayor porcentaje de compactación (%Gmm).

Para una temperatura de compactación de 110 °C y una presión de 325 Kg/cm², fue obtenida mayor dispersión del porcentaje de compactación (%Gmm) que para las otras combinaciones de temperatura y energía de compactación.

4.5. ESTABILIDAD MARSHALL

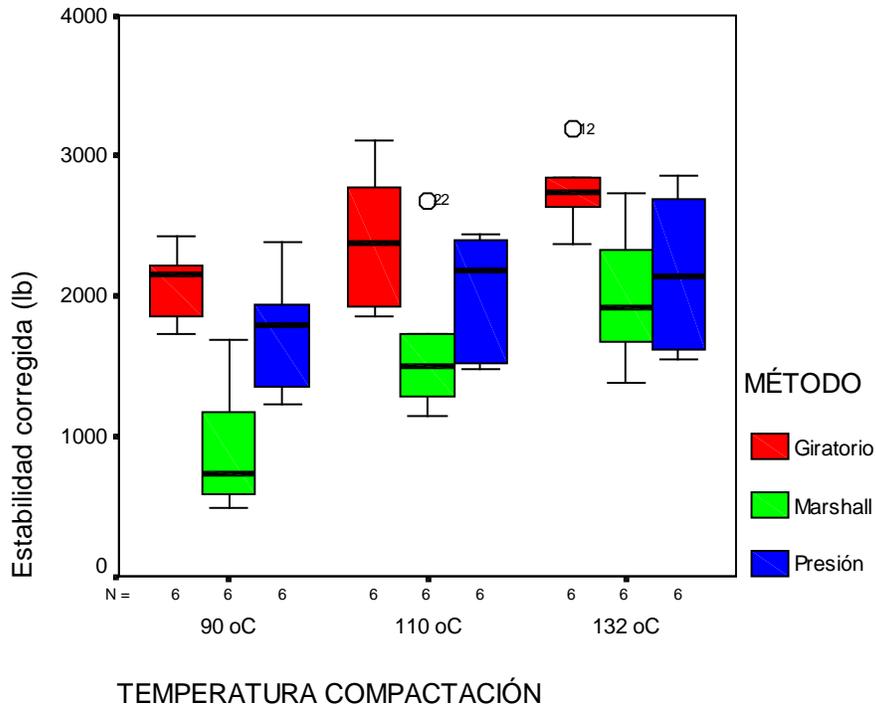


Figura 17. Análisis gráfico Estabilidad Marshall (Mecanismo de compactación).

Para compactación Marshall y a presión, se observa la tendencia de que los mayores valores de la estabilidad corregida se obtuvieron para las mezclas compactadas a la temperatura óptima.

Aproximadamente el 25% de las briquetas Marshall tienen menor estabilidad que el mínimo valor de estabilidad obtenido entre todas las muestras de presión estática.

Para compactación por amasado, se obtuvieron valores similares de estabilidad para las muestras compactadas a 110 y 130 °C.

Finalmente, se infiere que los valores de estabilidad de la mezcla están directamente relacionados con la densidad Bulk de la misma.

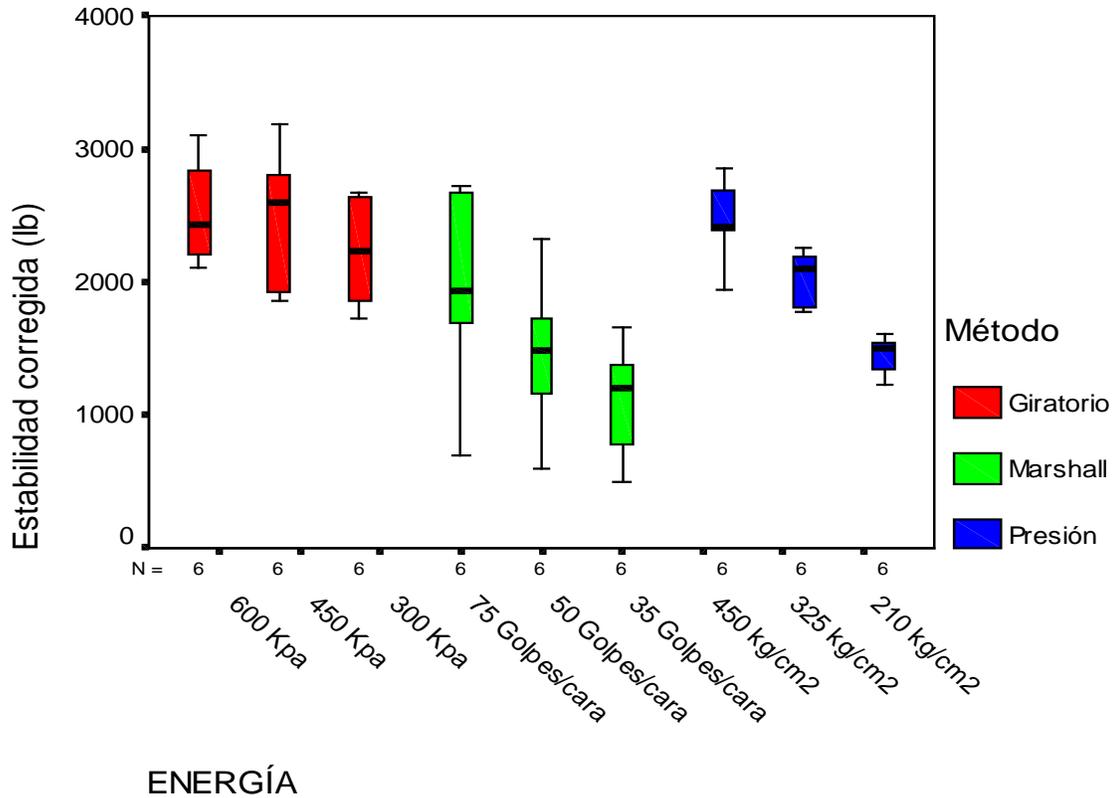


Figura 18. Análisis gráfico Estabilidad Marshall. (energía de compactación).

Para compactación por impacto y por presión se observa que a mayor energía de compactación se alcanzan mayores estabilidades, mientras que las muestras compactadas en el equipo giratorio tienen valores de estabilidad similares independientemente de la energía de compactación aplicada (esto se explica por los altos grados de compactación que se lograron con este mecanismo).

Para cada método, los máximos valores de estabilidad fueron obtenidos a una temperatura de compactación igual a 132 °C (Temperatura óptima de compactación).

En el anexo No. 12 se puede observar la variación de la estabilidad Marshall y flujo.

4.6. MÓDULO RESILIENTE.

En la figura No. 19, se puede ver claramente que la temperatura de ensayo es la variable que más afecta el módulo resiliente obtenido, esto debido al cambio en la rigidez de la mezcla.

De acuerdo con la mayoría de los datos se observa la tendencia de que para temperatura de ensayo constante y para un mismo mecanismo, los valores de modulo resiliente son muy similares; es decir, en estos casos, la energía de compactación tiene una influencia mínima en el proceso.

resiliente; igualmente, a mayor temperatura de ensayo menor variación del módulo resiliente.

A temperatura de compactación y temperatura de ensayo constantes, el módulo resiliente tiene una tendencia a ser prácticamente constante, especialmente para temperaturas altas; independientemente del método de compactación.

En el anexo No. 13 se hace la representación gráfica de la variación del módulo resiliente considerando las variables en estudio.

4.7. DEFORMACIÓN PERMANENTE (CREEP).

Tabla 17. Análisis de resultados ensayo creep

Muestra	% Gmm	D1	m	r2	Intercepto	Tasa de Creep	Deform. Total (1800 pulsos)	Creep
G05	95.76	644.1	0.2375	0.935	2760	0.45	3566	806
G07	95.87	648.7	0.2390	0.912	3000	0.52	3930	930
G36	96.58	749.3	0.2372	0.928	3445	0.58	4497	1052
M09	94.91	2023.2	0.1703	0.963	6070	0.69	7305	1235
M17	95.68	2266.0	0.1637	0.967	6500	0.70	7765	1265
M41	94.12	1874.0	0.1712	0.956	5830	0.64	6988	1158
P51	95.53	2715.0	0.1563	0.944	7400	0.76	8769	1369
P58	95.16	2146.4	0.1647	0.925	6315	0.67	7530	1215
P72	95.51	2566.4	0.1286	0.933	5880	0.48	6745	865

La información presentada en la tabla anterior, se calculó siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 3.5.2.

Teniendo en cuenta que el parámetro m esta relacionado con la tasa de

crecimiento de Creep, se puede inferir que las probetas compactadas en el equipo giratorio tienen mayor tasa de crecimiento de Creep que las briquetas compactadas a presión estática o por impacto.

De acuerdo con estos datos se puede afirmar que las briquetas compactadas a presión y las muestras compactadas por impacto presentan similares rangos no solo de deformación total promedio (6745 a 8769) sino también de valores de deformación permanente - Creep (1158.a 1369).

De otra parte, las probetas elaboradas con el equipo giratorio presentan menores valores de deformación total (3500 a 4500), lo cual es aproximadamente el 50% de las deformaciones totales obtenidas para las muestras compactadas a presión o por impacto. Igualmente las probetas compactadas por amasado tienen los menores valores de Creep en comparación con los otros dos métodos de compactación.

La diferencia en la resistencia a la deformación permanente obtenida para cada mecanismo de compactación se puede explicar debido al esqueleto mineral logrado en cada caso.

Para compactación a presión la mezcla tiene baja resistencia a la deformación porque el mecanismo de compactación es muy poco efectivo debido a que no hay efecto de amasado y por lo tanto no se reacomodan las partículas, lo cual produce

una mezcla poco estable.

En la compactación por impacto tampoco se produce amasado del concreto asfáltico y además el impacto del martillo compactador puede fracturar los agregados; lo cual puede ocasionar que la mezcla presente altos valores de deformación.

De otra parte, el compactador giratorio ejerce un efecto de amasado, lo cual permite que la mezcla asfáltica tenga un esqueleto mineral mucho mas firme y por lo tanto tenga mayor resistencia a la deformación permanente.

Es interesante mencionar aunque las briquetas G05, M17 Y P51 tienen el mismo porcentaje de compactación (%Gmm) (95.76%, 95.68% y 95.53% respectivamente), muestran diferente comportamiento en la prueba de Creep debido a que cada probeta fue elaborada por diferente mecanismo de compactación; en otras palabras, el tipo de compactación juega un papel clave dentro de este fenómeno.

Con base en lo anterior se puede concluir que el mecanismo de compactación utilizado es factor decisivo en la resistencia de la mezcla asfáltica a la deformación permanente debido principalmente a la variación de la estructura mineral obtenida, incluso para mezclas con igual porcentaje de compactación.

4.7.1. Cálculo del ahuellamiento (Propuesto por Van de Loo).

A manera de ejemplo se considera una estructura total de concreto asfáltico colocada directamente sobre la subrasante. Ver figura No. 20

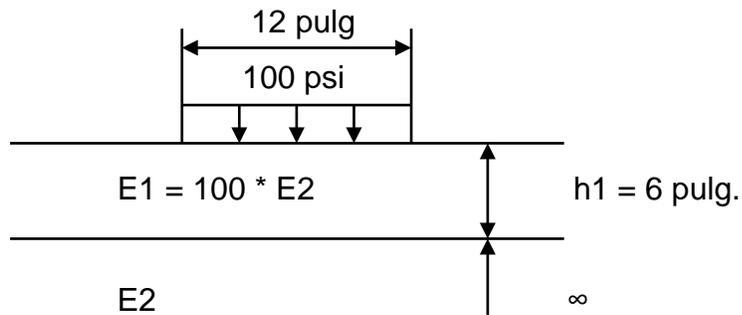


Figura 20. Ejemplo de cálculo del ahuellamiento.

Donde:

z = Profundidad del elemento.

a = Radio de carga.

q = Carga aplicada.

En este caso se solicita calcular la profundidad del ahuellamiento luego de 10.000 repeticiones de carga.

Si el número de aplicaciones de carga es N , entonces el tiempo en la prueba de creep correspondiente a N es $0.1 * N$ porque la duración de cada aplicación de carga es 0.1 segundos.

Inicialmente se debe calcular el esfuerzo promedio en la capa asfáltica; se sabe

que en la superficie el esfuerzo es igual a 100 psi, entonces se debe determinar el esfuerzo en la interfase mediante la utilización del ábaco de Burmister para determinación de esfuerzos bajo la aplicación de carga circular (Anexo No. 14).

Entrando con $z/a = 1$ y $E1/E2 = 100$, se obtiene $\sigma_z/q = 0.08$; por lo tanto:

$$\sigma_z = 0.08 * 100 \text{ psi} = 8 \text{ psi.}$$

De esta manera se determina $\sigma_{\text{PROMEDIO}} = (100 \text{ psi} + 8 \text{ psi})/2 = 54 \text{ psi}$

Considerando la muestra G05 para hacer el cálculo tipo:

$$\text{Ec. Creep a 500 pulsos (1000 segundos)} = 1.8 * 10^{(-5)} \text{ pulg}^2/\text{lb}$$

$$S_{\text{MEZCLA}} = 1/\text{ecuación de creep} = 1 / (1.8 * 10^{(-5)} \text{ pulg}^2/\text{lb}) = 5,47 * 10^4 \text{ psi}$$

Finalmente se aplica la ecuación general:

$$\text{Profundidad huella} = C_m * h_1 * (\sigma_{\text{PROMEDIO}}) / (S_{\text{MEZCLA}})$$

$$\text{Profundidad huella} = 1 * 6'' * 54 \text{ psi} / (5,47 * 10^4 \text{ psi}) = 0.0059 \text{ pulg} = 0.15 \text{ mm.}$$

La tabla No. 18 presenta los resultados para cada una de las probetas que se les hizo la prueba de creep.

Tabla 18. Resultados de ahuellamiento de las muestras.

Muestra	% Gmm	Ec. Creep (mm²/kN)	Ec. Creep (pulg²/lb)	SMEZCLA	Prof. Huella (pulg)	Prof. Huella (mm)
G05	95,761	2.65	1.83E-05	54767	0.0059	0.15
G07	95,867	2.86	1.98E-05	50631	0.0064	0.163
G36	96,580	3.27	2.26E-05	44326	0.0073	0.186
M09	94,911	5.83	4.02E-05	24878	0.013	0.331
M17	95,684	6.27	4.32E-05	23142	0.014	0.356
M41	94,120	5.56	3.84E-05	26071	0.0124	0.316
P51	95,532	7.17	4.94E-05	20224	0.016	0.407
P58	95,162	5.97	4.12E-05	24280	0.0133	0.339
P72	95,511	5.71	3.93E-05	25414	0.0127	0.324

Esta información permite verificar nuevamente que las briquetas compactadas con el equipo giratorio presentan mejores características, en este caso se puede notar la mayor resistencia a la deformación permanente, la cual es lograda gracias a una mejor reorientación de partículas y por lo tanto en un esqueleto mineral mucho mas resistente.

5. CONCLUSIONES

1. La conclusión general de este trabajo investigativo, es que con los materiales de construcción usados en la región se verificó a nivel de laboratorio las ventajas de la compactación giratoria usada en el método de diseño de mezclas Superpave frente a otros métodos, por ejemplo compactación por impacto del método de diseño Marshall tradicionalmente usado en nuestro medio.
2. El trabajo logra demostrar el avance alcanzado en la compactación de mezclas en laboratorio con equipo giratorio, al obtener mezclas más homogéneamente compactadas tal que se disminuye la dispersión al determinar sus propiedades.
3. De acuerdo con esta investigación, los métodos de compactación pueden ser ordenados de mayor a menor eficiencia en términos de porcentaje de compactación (%Gmm) como sigue: Giratorio, Marshall y Presión. De la misma manera, se apreció que la dispersión del porcentaje de compactación (%Gmm) fue menor para la compactación con el equipo giratorio, intermedia para presión estática y mayor para el equipo Marshall.
4. Bajo las condiciones de trabajo adoptadas para compactación por presión estática, se observa que a presión constante, la temperatura de compactación de las briquetas ejerce un efecto mínimo sobre el porcentaje de compactación

(%Gmm). Análogamente, a temperatura de compactación constante; a mayor presión, mayor %Gmm.

5. Para compactación Marshall, la tendencia es que para temperatura de compactación constante, a mayor energía de compactación, mayor %Gmm. Igualmente, para una energía de compactación constante, a mayor temperatura de compactación, mayor porcentaje de compactación (%Gmm).

6. Para la compactación con el equipo giratorio, a una temperatura de compactación constante, parece que no necesariamente a mayor energía de compactación, se logra mayor densificación porque se encontraron ciertos casos en los cuales, por el contrario, al incrementar la energía de compactación, se redujo el porcentaje de compactación (%Gmm) de la mezcla.

7. Independientemente del método, los máximos valores de estabilidad Marshall se obtuvieron con las briquetas compactadas a la temperatura óptima de compactación; sin embargo, para condiciones de temperatura constante, la eficiencia de los diferentes mecanismos de compactación representada en términos de estabilidad, se puede ordenar de mayor a menor como sigue: Giratorio, presión y Marshall.

8. El valor del módulo resiliente de las briquetas elaboradas con el equipo giratorio es más susceptible a los cambios de la temperatura de ensayo, en comparación con las probetas compactadas con equipo Marshall ó a presión estática. Pero a su vez,

las muestras compactadas por amasado presentan menor dispersión del módulo resiliente trabajando a temperatura de ensayo constante.

9. Para las condiciones de compactación adoptadas en este trabajo, se observó que a temperatura de compactación y temperatura de ensayo constantes, el módulo resiliente tiende a ser constante, en especial para altas temperaturas de ensayo; independientemente del método de compactación utilizado.

10. Las briquetas compactadas a presión o por impacto tienen comportamientos de deformación permanente muy similares (valores de D_1 y m); esto es debido a la estructura mineral obtenida. Sin embargo, las probetas elaboradas por amasado generan menor deformación total que los otros dos métodos evaluados, lo cual comprueba que la compactación por amasado brinda una estructura granular mas resistente al ahuellamiento.

11. Se ensayaron tres briquetas de igual composición volumétrica ($\%G_{mm} = 95.6$), cada una compactada por diferente mecanismo y se obtuvieron valores de deformación total muy diferentes, por lo cual se infiere que para garantizar mezclas asfálticas resistentes al ahuellamiento, como control de calidad en la obra no solo se debe exigir cierto porcentaje de compactación ($\%G_{mm}$) sino que se deberían incluir otras variables que puedan afectar dicho proceso, por ejemplo, los parámetros obtenidos de las pruebas de Creep.

6. RECOMENDACIONES

1. Continuar esta investigación con el propósito de correlacionar la información obtenida hasta el momento con el comportamiento del concreto asfáltico en la vía. Específicamente, se sugiere implementar la prueba de creep como un ensayo de control de calidad para la construcción de mezclas asfálticas y de igual manera profundizar en el cálculo de ahuellamiento de mezclas asfálticas para las vías de nuestro país.
2. Realizar investigaciones con base en diseños y análisis de experimentos, apoyados en el uso de programas computacionales con el fin de obtener información válida estadísticamente.

7. BIBLIOGRAFIA

ASPHALT INSTITUTE. "Superpave". Superpave mix desing. Superpave series No. 1 (sp-1) and No.2 (sp-2) 1996.

BRIAN J. COREE AND KERA VANDERHORST. "Superpave compaction" transportation conference proceedings. 1998.

BROWN, E.R., Experiences of corps of engineers in compaction of hot asphalt mixtures, placement and compaction of asphalt mixtures, ASTM stp 829, f.t. wagner, ed., American society for testing and materials, 1984, pp. 67-79.

BSI STANDARDS, Methods for determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous mixtures. 1996.

Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas asfálticas compactadas (ensayo de inmersión- compresión). I.N.V. e-738.

Especificaciones generales de construcción de carreteras. Pavimentos asfálticos. Instituto Nacional de Vías. Bogotá. Colombia.

GELLER, M., "Compaction equipment for asphalt mixtures," Placement and compaction of asphalt mixtures, ASTM stp 829, f.t. Wagner, ed., American Society for Testing and Materials, 1984, pp. 28-47.

HADLEY, W.O., HUDSON, W.R., KENNEDY, T.W., "Correlation of indirect tensile test results with stability and cohesiometer values for asphalt-treated materials and 63 64

discussion,” proceedings: association of asphalt paving technologists, vol. 39, 1970, pp. 745-765.

HARTMAN, A.M.; GILCHRIST, M.D. AND WALSH, G. Effect of mixture compaction on indirect tensile stiffness and fatigue. Journal of transportation engineering. October 2001.

HARVEY, J.T., AND TSAI, B-W., “Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness,” Transportation Research record 1543: design and construction of asphalt overlays and hot-mix asphalt construction practices, transportation research board, national academy press, Washington D.C., 1996, pp. 38-45.

Hot-mix asphalt paving handbook. AASHTO, FHWA, NAPA, U.S. Army Corps of Engineers, American Public Works Association, National Association of County Engineers. United States of America 2000.

Hot mix asphalt tender zone NCAT report No. 2000-02 by Brown E. R., Lord Byron, Decker Dale and Newcomb Dave. April 2000.

HUANG, Yang H. Pavement analysis and desing. University of Kentucky. 1993. P. 347

KENNEDY, T.W., ROBERTS, F.L., AND MCGENNIS, R.B., “Effects of compaction temperature and effort on the engineering properties of asphalt concrete mixtures,” placement and compaction of asphalt mixtures, ASTM stp 829, f.t. Wagner, ed., American Society for Testing and Materials, 1984, pp. 48-66.

Manual para realización del ensayo 003: ensayo de tensión indirecta en cinco pulsos por carga diametral. Universidad Nacional – Sede Manizales.

Manual para la realización del ensayo 007: ensayo de carga dinámica uniaxial de

flujo. Universidad Nacional – Sede Manizales.

MCLEOD, N.W., "Influence of viscosity of asphalt cements on compaction of paving mixtures in the field," highway research record no. 158, highway research board national academy of sciences, Washington D.C., 1960.

MONTEJO FONSECA, Alfonso. Ingeniería de pavimentos para carreteras. Universidad Católica de Colombia. 2ª. Edición. Bogotá, 2001.

NIJBOER, L.W., Plasticity as a factor in the design of dense bituminous road carpets, Elsevier publishing, New York, 1948.

OWERS, G.F., "Introductory soil mechanics and foundations: geotechnical engineering," 4th ed., Macmillan publishing co., Inc., New York, 1979.

Resistencia a la deformación plástica de mezclas bituminosas empleando el aparato Marshall. Nlt-159/86.

Resistencia a la compresión simple de mezclas bituminosas. I.N.V. E – 747.

ROBERTS FREDDY, KANDHAL PRITHVI, BROWN RAY, LEE DAH-YINN, AND KENNEDY THOMAS. Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. National center for asphalt technology NAPA. Second edition 1996 Lanham, Maryland.

SHANE BUCHANAN, M.; ALLEN COOLEY, L. Case studies of the tender zone in coarse graded Superpave mixtures. Draft final; jr. January 2002 NCAT report 02-01.

SHANE BUCHANAN, M.; ALLEN COOLEY, L. Investigation of the tender zone in the compaction of coarse-graded Superpave hot mix asphalt (HMA) mixes paper 03-

2334. July 24, 2002 original draft November 12, 2002 revised draft.

Standard test methods for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particles shape, surface texture, and grading). ASTM. Designation: C 1252-98.

VAN DE LOO, "Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability," proceedings. Association of asphalt paving technologists. 1974.

VAN DE LOO, "The creep test: a key tool in asphalt mix design and in the prediction of pavement rutting, " proceedings, association of asphalt paving technologists. 1978.