

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DE UNA
MEZCLA ASFALTICA EN SU DEFORMACIÓN PERMANENTE Y LA
SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD**

**GERARDO HAMID HERNÁNDEZ CABRERA
FERNANDO RAMÍREZ RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2016**

**ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL GRADO DE COMPACTACIÓN DE UNA
MEZCLA ASFÁLTICA EN SU DEFORMACIÓN PERMANENTE Y LA
SUSCEPTIBILIDAD A LA HUMEDAD**

**GERARDO HAMID HERNÁNDEZ CABRERA
FERNANDO RAMÍREZ RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
Ing. Juan Carlos Ruge**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO
BOGOTÁ
2016**



La presente obra está bajo una licencia:
Atribución 2.5 Colombia (CC BY 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by/2.5/co/>

Usted es libre de:

- Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
- hacer obras derivadas
- hacer un uso comercial de esta obra



Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	9
1. GENERALIDADES	10
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	10
1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos	12
1.4 MARCO DE REFERENCIA	12
1.4.1 Marco Teórico.	12
1.4.1.1 Aplicación de Mezclas Asfálticas	12
1.4.1.2 Compactación de Mezcla Asfáltica	13
1.4.1.3 Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Método Marshall	15
1.4.1.4 Densidad.	16
1.4.1.5 Vacíos De Aire (O Simplemente Vacíos).	16
1.4.1.6 Vacíos En El Agregado Mineral	17
1.4.1.7 Contenido de Asfalto	17
1.4.1.8 Estabilidad	18
1.4.1.9 Resistencia a la Fatiga	19
1.4.1.10 Comportamiento Plástico de las Mezclas Asfálticas	20
1.4.1.11 Predicción del Ahuellamiento: Ensayos de Laboratorio	23
1.4.1.12 Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas al Efecto del Agua	24
2. METODOLOGÍA	26
2.1 PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA DE PRUEBA	26
2.2 DETERMINACIÓN CONTENIDO DE ASFALTO Y RICE	27
2.3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 756 – 13	28
2.3.1 Cálculos	30
2.4 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13	31
3. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO	36
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
5. PRESUPUESTO DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS	44
6. CONCLUSIONES	45

	pág.
7. RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Arbol del Problema	11
Figura 2. Aplicación de Mezcla Asfáltica	13
Figura 3. Compactación Mezcla Asfáltica	14
Figura 4. VMA en una Probeta de Mezcla	17
Figura 5. Evolución de la Deformación Permanente para a) Una Carga Estática, b) Una Carga Cíclica	21
Figura 6. Etapas de la Deformación Permanente	21
Figura 7. Cámara de Temperatura Controlada 60°C	24
Figura 8. Determinación Contenido de Asfalto Mezcla de Prueba	27
Figura 9. Determinación de Gravedad Específica Máxima Medida	27
Figura 10. Molde para Compactación de Probetas de Pista	28
Figura 11. Programación Compactador Mecánico	28
Figura 12. Probetas para Ensayo de Pista a los Grados de Compactación Especificados	29
Figura 13. Montaje de la Probeta en la Cámara de Temperatura	29
Figura 14. Vista de Huella Producida por Rueda de Ensayo	30
Figura 15. Marca de Ahuellamiento en Probeta Critica 90% Gmm	30
Figura 16. Calculo Velocidad Media de Deformación	31
Figura 17. Compactación en Equipo Marshall	32
Figura 18. Determinación de Masas para Densidad Bulk	32
Figura 19. Sub-grupo de Probetas Llevadas a Inmersión	33
Figura 20. Determinación Resistencia a la Tensión	33
Figura 21. Forma de Falla Probetas Marshall	34
Figura 22. Evaluación de Falla a un grupo seco y saturado	34
Figura 23. Evaluación de Falla en una Probeta en Inmersión	34
Figura 24. Evaluación de Falla en una Probeta en Seco	34
Figura 25. Fórmula para Calcular la Resistencia a la Tensión	35
Figura 26. Resistencia a Tensión	35
Figura 27. Cálculo Relación de Resistencias a Tensión	35
Figura 28. Grafica de Resultados INV 725 a 75 Golpes	37
Figura 29. Grafica de Resultados INV 725 a 72 Golpes	37
Figura 30. Resultados INV 725 a 68 Golpes	38
Figura 31. Resultados INV 725 a 64 Golpes	38
Figura 32. Resultados INV 725 a 60 Golpes	39
Figura 33. Relación de Resistencia Vs Grado de Compactación	40
Figura 34. Profundidad de Huella Vs Número de Ciclo de Carga INV 725	41
Figura 35. Grado de Compactación Vs Ahuellamiento	42

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Causas y Efectos de Inestabilidad en el Pavimento	19
Cuadro 2. Causas y Efectos de una Poca Durabilidad	20
Cuadro 3. Factores que Afectan la Deformación Permanente en las Mezclas Asfálticas	22
Cuadro 4. Influencia de Distintos Factores en los Parámetros de la Deformación Permanente	22
Cuadro 5. Resultados Promedio Resistencia a Tensión INV 725	39
Cuadro 6. Resultados Ensayo INV 756	40
Cuadro 7. Velocidades de Deformación-Tasa de Ahuellamiento	42
Cuadro 8. Velocidades de Deformación-Tasa Ahuellamiento	42
Cuadro 9. Presupuesto del Trabajo y Recursos Financieros	44

GLOSARIO

AGREGADO: agregado se le conoce a la combinación de arenas, gravas o hasta rocas trituradas ya sea en presentación natural o con algún proceso.

AHUELLAMIENTO: deterioro gradual del pavimento que se manifiesta con un hundimiento generalmente en el sentido de circulación de las llantas.

ASFALTO: mineral bituminoso de origen natural o artificial por medio de la destilación del petróleo

Betún: sustancia orgánica de alta viscosidad proveniente del petróleo y resultado de su proceso de destilación.

COMPACTACIÓN: se llama compactación al hecho de aumentar la densidad de un material, disminuyendo sus vacíos al aplicar cargas que producen compresión al material

DEFORMACIONES: se llama deformaciones a los cambios en tamaño o forma de materiales o mezclas.

EXTENDEDORA: máquina para la construcción de pavimentos, tiene como objetivo el extendido uniforme del aglomerado asfáltico.

FATIGA: disminución de la resistencia de un material, por sometimiento a cargas repetitivas.

FÍLLER: en Ingles “Relleno”, hace referencia al material fino que ocuparía los vacíos de pequeños tamaños.

MEZCLA: resultado de la unión de los materiales. Unión de agregados y asfalto

PLANEIDAD: calidad de plano, liso sin ondulaciones.

RODILLO ESTÁTICO DE NEUMÁTICOS: máquina de compactación que cuenta con neumáticos para realizar la compactación.

RODILLO VIBRANTE TÁNDEM: máquina de compactación autopropulsada con dos cilindros vibratorios.

INTRODUCCIÓN

En el proceso constructivo de las capas de una estructura de pavimento influyen distintos factores que hacen que ella tenga un óptimo comportamiento frente a los esfuerzos que va a enfrentar durante su vida útil de servicio, uno de los principales factores que influye en el funcionamiento óptimo de una mezcla asfáltica es su densificación y la relación de vacíos que pueda llegar a tener después de un proceso de compactación.

La compactación es una variable que de manera constante es parte importante de la etapa constructiva de un pavimento, sin embargo, se hace un proceso difícil de garantizar al 100%. En lugares de difícil acceso suele realizarse el proceso constructivo en ausencia de un profesional que garantice el correcto porcentaje de compactación y esto conlleva a futuras fallas del pavimento y deficiencias en su óptimo servicio a la comunidad.

En este informe planteamos la afectación que genera una compactación por debajo de los parámetros solicitados en una mezcla asfáltica, estudiando la falla del “ahuellamiento” o deformación permanente y la susceptibilidad al agua, ensayos que brindan valores de afectación de las variables estudiadas en las capas asfálticas y establecen qué tan influyente puede ser un grado de compactación un poco menor a 100%, tal como se trabaja en los materiales granulares que conforman las capas que preceden a la capa asfáltica.

1. GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En nuestro país, se ha vuelto común entre la ciudadanía el hecho de salir a la calle y encontrar incontables estructuras de pavimentos en mal estado. Se estima, que “en Colombia sólo el 15% de las vías están pavimentadas”¹ lo cual es un porcentaje muy bajo; teniendo en cuenta que la economía está ligada a la calidad de la red vial de un país, podríamos entender el mal momento económico por el que atraviesa Colombia.

No obstante, la ingeniería de pavimentos está establecida en la normatividad, con el objetivo de garantizar las mínimas condiciones que se debe cumplir en la construcción de una estructura de pavimento para que brinde un adecuado servicio, presente una durabilidad razonable bajo unos costos controlados. Pero aun así, hay una gran proporción de vías en mal estado.

Debido a que las causas que llevan al deterioro de un pavimento son muchas, además, de depender del comportamiento del suelo y fenómenos impredecibles, al momento de realizar un diseño se establece un tiempo útil de vida del mismo, es decir que los pavimentos están destinados como edificaciones, presas, puentes etc. la falla a un periodo bastante corto, comparado con otros tipos de estructuras

Lo que hace aún más delicado el asunto, es que la falta de ética y moral de muchos profesionales y la mala preparación de algunos, incrementa el porcentaje de falla en los pavimentos. Malos diseños, errores constructivos, corrupción entre otros factores humanos, han convertido las construcciones de vías en un jugoso negocio con infinidad de alternativas de lucro que comprometen la calidad de la obra.

Encontrar un pavimento deteriorado o en mal estado no es para nada difícil, y tendríamos que tomar muestras de cada pavimento y desarrollar en laboratorio alguna serie de ensayos para establecer si el diseño del mismo fue el adecuado lo anterior junto a conocimientos dados por la experiencia, aunque, la falla podría atribuirse a malos diseños que se detecten en el laboratorio, hay muchos factores externos que podrían ser la causa de la falla, pero es la alternativa más sustentada y cercana a los estudios que se han hecho sobre los pavimentos.

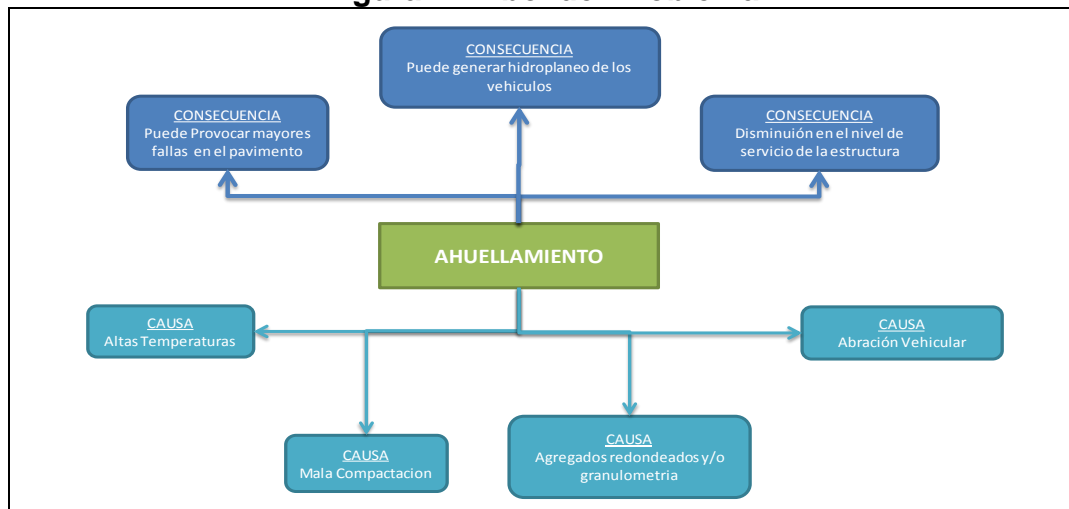
¹ REVISTA DINERO. Solo el 15% de las carreteras colombianas están pavimentadas [en línea]. Bogotá: La Revista [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.dinero.com/pais/articulo/estudio-sobre-infraestructura-colombia-2014/203641>>

1.2 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El comportamiento físico de la estructura de un pavimento depende en gran medida del diseño de la mezcla asfáltica, de éste diseño obtenemos la gradación más apropiada y su porcentaje óptimo de asfalto, los cuales brindan estabilidad y una buena distribución de los esfuerzos, que garantizan un buen desempeño en la estructura de la capa asfáltica. No obstante estos diseños son ejecutados en condiciones óptimas cuando de elaboración de probetas de ensayo se trata.

En el proceso constructivo del pavimento existen variables que pueden afectar las condiciones óptimas del diseño inicial, una variable muy compleja de garantizar es el porcentaje de compactación, pero: ¿qué tan importante es la compactación que se aplica a la mezcla en el momento de su instalación? teniendo en cuenta que por condiciones de tipo constructivo tal como ocurre con el grado de compactación de los suelos granulares que conforman las capas inferiores a la rodadura, son admisibles grados de compactación inferiores al 100%, por lo cual se hace necesario establecer la influencia que puede llegar a tener la densidad y su relación de vacíos dados por su grado de compactación en una mezcla asfáltica, en el presente informe para la falla de deformación permanente “Ahuellamiento” y la susceptibilidad al agua se establece que tan influyente puede llegar a ser una mala compactación (véase la Figura 1).

Figura 1. Arbol del Problema



Fuente. Los Autores

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General. Establecer la influencia que puede llegar a tener la densidad y su relación de vacíos dados por el grado de compactación, con la falla de la deformación permanente (Ahuellamiento) y la susceptibilidad al agua en las capas de asfalto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Medir el grado de afectación que conlleva no compactar adecuadamente una capa de pavimento flexible en la susceptibilidad que puede presentar a la humedad.
- Medir el grado de afectación que conlleva no compactar adecuadamente una capa de pavimento flexible en su deformación permanente.
- Lograr una investigación técnica de alta precisión, que nos brinde resultados confiables teniendo en cuenta que se contará con equipos de alta precisión y garantías de resultados, además de experiencia técnica en la elaboración de los ensayos requeridos.
- Determinar un rango mínimo de compactación en el que la capa de asfalto no sea afectada en su óptimo funcionamiento en la deformación permanente y la susceptibilidad a la humedad.

1.4 MARCO DE REFERENCIA

1.4.1 Marco Teórico.

1.4.1.1 Aplicación de Mezclas Asfálticas. Las Mezclas Bituminosas o Asfálticas en Caliente son aquellas combinaciones de áridos, incluyendo el polvo mineral, más un ligante hidrocarbonado y ante eventualidad, aditivos, todos ellos combinados a los efectos de que todas las partículas del árido queden cubiertas por una película de ligante homogénea.

Su proceso de fabricación consiste en calentar el ligante junto con los áridos, exceptuando el polvo mineral de aportación, y se realiza su puesta en obra con una temperatura muy superior a la ambiente.

Estas mezclas asfálticas se llevan a cabo en plantas, efectuando un control exhaustivo de las características de la producción. Luego se transportan en camiones que disponen de cajas lisas y estancas, tratadas interiormente con un producto que impide la adherencia de la mezcla bituminosa; se cubren con lonas y luego se realiza la distribución de la mezcla con extendedoras mecánicas y consolidándolo con rodillos adecuados. Para el sellado de la capa de rodadura es obligatorio el uso de apisonadora neumática² (véase la Figura 2).

² CONSTRUMATICA. Aplicación de Mezclas Bituminosas [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.construmatica.com/construpedia/Aplicaci%C3%B3n_de_Mezclas_Bituminosas >

Figura 2. Aplicación de Mezcla Asfáltica



Fuente. CONSTRUMATICA. Aplicación de Mezclas Bituminosas [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.construmatica.com/construpedia/Aplicaci%C3%B3n_de_Mezclas_Bituminosas>

1.4.1.2 Compactación de Mezcla Asfáltica. Las tareas de compactación logran que la mezcla llegue a la densidad óptima requerida. Se realiza en forma uniforme en toda la superficie extendida para hacer coincidir el perfil definitivo con el proyectado.

- Se recomienda que la extendedora produzca la máxima pre compactación considerando en lo posible alcanzar cifras que superen el 90%.
- Pre compactar es conveniente no solo porque se reduce el número de pasadas sino también porque se consigue una mejor planeidad de la superficie.
- Se comienza el compactado tras la extendedora con un rodillo vibrante tándem.
- En la primera pasada el rodillo delantero no produce vibración, y el trasero avanza vibrando.
- En la segunda pasada, se realiza marcha atrás, los dos rodillos avanzan vibrando. Por ello se requiere que el rodillo tándem tenga vibración independiente para cada rodillo.
- Después del rodillo vibrante se pasa el rodillo estático de neumáticos para cerrar y lograr una buena apariencia superficial a la mezcla.
- El número definitivo de pasadas está en función de los resultados del tramo de ensayos.
- En sectores inaccesibles se lleva a cabo la compactación con maquinaria del tamaño y diseño adecuados para pasarla sin problemas.

➤De cualquier manera, es aconsejable efectuar las pruebas previas para lograr una textura superficial buena libre de grietas y arrollamientos³ (véase la Figura 3).

Figura 3. Compactación Mezcla Asfáltica



Fuente. CONSTRUMATICA. Aplicación de Mezclas Bituminosas [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.construmatica.com/construpedia/Aplicaci%C3%B3n_de_Mezclas_Bituminosas>

Una de las tareas más delicadas e importantes de la puesta en obra del aglomerado asfáltico es su compactación, pues de ella depende en gran parte la calidad final del firme. Se trata de alcanzar una alta densidad que garantice la durabilidad prevista e impida irregularidades superficiales. La compactación debe llegar a la densificación marcada por el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, normalmente entre el 95 y 98 % de la densidad Marshall de referencia, todo ello conservando la geometría superficial dada por la extendedora.

La compactación se realizará siempre que la trabajabilidad de la mezcla sea la suficiente. En las mezclas en caliente se debe comenzar a compactar con la temperatura más alta posible (superior a 120°C), siempre que se pueda soportar la carga del compactador sin arrollamientos ni agrietamientos. En frío debe existir la suficiente presencia de fluidificantes en las mezclas abiertas o de la propia agua de la emulsión en las mezclas densas⁴.

Los factores que influyen en la compactación de un aglomerado asfáltico son, entre otros, los siguientes:

³ CONSTRUMATICA. Aplicación de Mezclas Bituminosas [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.construmatica.com/construpedia/Aplicaci%C3%B3n_de_Mezclas_Bituminosas>

⁴ YEPES PIQUERAS, Víctor. La compactación de las mezclas asfálticas [en línea]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/02/18/la-compactacion-de-las-mezclas-asfalticas/>>

➤ **Tipo de firme.** Cada tipo de mezcla presentará diferente dificultad para ser compactado, por ejemplo, la fracturación, tamaño y forma de los áridos.

➤ **Acabado superficial.** Según la calidad del acabado requerido la compactación deberá realizarse de forma diferente.

➤ **Contenido de betún.** El betún actúa como lubricante entre las partículas, aunque no debería ser excesivo para evitar la inestabilidad de la mezcla.

➤ **Proporción y tipo de filler.** A mayor contenido de filler, mayor dificultad de compactación, puesto que actúa como estabilizante del betún.

➤ **Espesor de capa.** Si bien un mayor espesor de capa produce más rendimiento, el espesor suele estar marcado por el proyecto.

➤ **Temperatura.** La temperatura de compactación de la mezcla en caliente siempre es muy superior a la del ambiente, por lo que se enfría rápidamente, impidiendo la compactación posterior. Pero tampoco es acertado pasarse en temperatura, pues provoca la inestabilidad de la mezcla. Se pueden dar los siguientes valores a efectos prácticos:

✓ Temperatura a la salida de la planta	135 – 180°
✓ Temperatura a la salida de la extendedora	120 – 150°
✓ Temperatura durante la compactación	85 – 150°

La primera compactación la realiza la propia extendedora, llegando con su vibración a conseguir un 80% de la densidad teórica Marshall. Aunque esta cifra parece elevada, es lo suficientemente baja como para tener que compactar con maquinaria específica⁵.

1.4.1.3 Diseño de Mezclas Asfálticas en Caliente Método Marshall. Una muestra de mezcla de pavimentación preparada en el laboratorio puede ser analizada para determinar su posible desempeño en la estructura del pavimento.

El análisis está enfocado hacia cuatro características de la mezcla, y la influencia que estas puedan tener en el comportamiento de la mezcla. Las cuatro características son:

- Densidad de la mezcla.
- Vacíos de aire, o simplemente vacíos.
- Vacíos en el agregado mineral.
- Contenido de asfalto⁶.

⁵ YEPES PIQUERAS, Víctor. La compactación de las mezclas asfálticas [en línea]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/02/18/la-compactacion-de-las-mezclas-asfalticas/>>

⁶ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

1.4.1.4 Densidad. La densidad de la mezcla compactada está definida como su peso unitario (el peso de un volumen específico de la mezcla). La densidad es una característica muy importante debido a que es esencial tener una alta densidad en el pavimento terminado para obtener un rendimiento duradero.

En las pruebas y el análisis del diseño de mezclas, la densidad de la mezcla compactada se expresa, generalmente, en kilogramos por metro cúbico. La densidad es calculada al multiplicar la gravedad específica total de la mezcla por la densidad del agua (1000 kg/m³). La densidad obtenida en el laboratorio se convierte la densidad patrón, y es usada como referencia para determinar si la densidad del pavimento terminado es, o no, adecuada. Las especificaciones usualmente requieren que la densidad del pavimento sea un porcentaje de la densidad del laboratorio. Esto se debe a que rara vez la compactación in situ logra las densidades que se obtienen usando los métodos normalizados de compactación de laboratorio⁷.

1.4.1.5 Vacíos De Aire (O Simplemente Vacíos). Los vacíos de aire son espacios pequeños de aire, o bolsas de aire, que están presentes entre los agregados revestidos en la mezcla final compactada.

Es necesario que todas las mezclas densamente graduadas contengan cierto porcentaje de vacíos para permitir alguna compactación adicional bajo el tráfico, y proporcionar espacios adonde pueda fluir el asfalto durante su compactación adicional.

El porcentaje permitido de vacíos (en muestras de laboratorio) para capas de base y capas superficiales está entre 3 y 5 por ciento, dependiendo del diseño específico. La durabilidad de un pavimento asfáltico es función del contenido de vacíos. La razón de esto es que entre menor sea la cantidad de vacíos, menor va a ser la permeabilidad de la mezcla. Un contenido demasiado alto de vacíos proporciona pasajes, a través de la mezcla, por los cuales puede entrar el agua y el aire, y causar deterioro. Por otro lado, un contenido demasiado bajo de vacíos puede producir exudación de asfalto; una condición en donde el exceso de asfalto es exprimido fuera de la mezcla hacia la superficie. La densidad y el contenido de vacíos están directamente relacionados. Entre más alta la densidad menor es el porcentaje de vacíos en la mezcla, y viceversa. Las especificaciones de la obra requieren, usualmente, una densidad que permita acomodar el menor número posible (en la realidad) de vacíos: preferiblemente menos del 8 por ciento⁸.

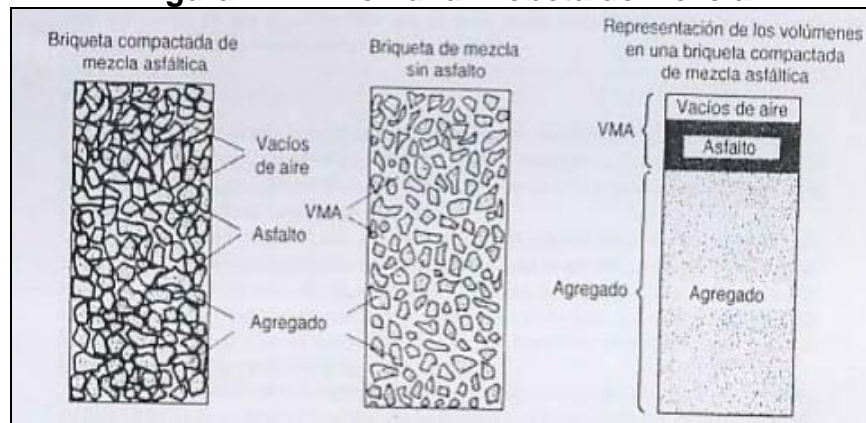
⁷ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

⁸ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

1.4.1.6 Vacíos En El Agregado Mineral. Los vacíos en el agregado mineral (VMA) son los espacios de aire que existen entre las partículas de agregado en una mezcla compactada de pavimentación, incluyendo los espacios que están llenos de asfalto.

El VMA representa el espacio disponible para acomodar el volumen efectivo de asfalto (todo el asfalto menos la porción que se pierde en el agregado) y el volumen de vacíos necesario en la mezcla. Cuando mayor sea el VMA más espacio habrá disponible para las películas de asfalto. Existen valores mínimos para VMA los cuales están recomendados y especificados como función del tamaño del agregado. Estos valores se basan en el hecho 63 de que cuanto más gruesa sea la película de asfalto que cubre las partículas de agregado, más durables será la mezcla⁹ (véase la Figura 4).

Figura 4. VMA en una Probeta de Mezcla



Fuente. UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

1.4.1.7 Contenido de Asfalto. La proporción de asfalto en la mezcla es importante y debe ser determinada exactamente en el laboratorio, y luego controlada con precisión en la obra.

El contenido de asfalto de una mezcla particular se establece usando los criterios (discutidos más adelante) dictados por el método de diseño seleccionado. El contenido óptimo de asfalto de una mezcla depende, en gran parte, de las características del agregado tales como la granulometría y la capacidad de absorción. La granulometría del agregado está directamente relacionada con el contenido óptimo del asfalto. Entre más finos contenga la graduación de la mezcla, mayor será el área superficial total, y, mayor será la cantidad de asfalto requerida para cubrir, uniformemente, todas las partículas. Por otro lado las mezclas más

⁹ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

gruesas (agregados más grandes) exigen menos asfalto debido a que poseen menos área superficial total. La relación entre el área superficial del agregado y el contenido óptimo de asfalto es más pronunciada cuando hay relleno mineral (fracciones muy finas de agregado que pasan a través del tamiz de 0.075 mm (Nº 200). Los pequeños incrementos en la cantidad de relleno mineral, pueden absorber, literalmente, gran parte del contenido de asfalto, resultando en una mezcla inestable y seca. Las pequeñas disminuciones tienen el efecto contrario: poco relleno mineral resulta en una mezcla muy rica (húmeda). Cualquier variación en el contenido o relleno mineral causa cambios en las propiedades de la mezcla, haciéndola variar de seca a húmeda. Si una mezcla contiene poco o demasiado, relleno mineral, cualquier ajuste arbitrario, para corregir la situación, probablemente la empeorará. En vez de hacer ajuste arbitrario, se deberá efectuar un muestreo y unas pruebas apropiadas para determinar las causas de las variaciones y, si es necesario, establecer otro diseño de mezcla. La capacidad de absorción (habilidad para absorber asfalto) del agregado usado en la mezcla es importante para determinar el contenido óptimo de asfalto. Esto se debe a que se tiene que agregar suficiente asfalto a la mezcla para permitir absorción, y para que además se puedan cubrir las partículas con una película adecuada de asfalto. Los técnicos hablan de dos tipos de asfalto cuando se refieren al asfalto absorbido y al no absorbido: contenido total de asfalto y contenido efectivo de asfalto. El contenido total de asfalto es la cantidad de asfalto que debe ser adicionada a la mezcla para producir las cualidades deseadas en la mezcla. El contenido efectivo de asfalto es el volumen de asfalto no absorbido por el agregado; es la cantidad de asfalto que forma una película ligante efectiva sobre la superficie de los agregados. El contenido efectivo de asfalto se obtiene al restar la cantidad absorbida de asfalto del contenido total de asfalto. La capacidad de absorción de un agregado es, obviamente, una característica importante en la definición del contenido de asfalto de una mezcla. Generalmente se conoce la capacidad de absorción de las fuentes comunes de agregados, pero es necesario efectuar ensayos cuidadosos cuando son usadas fuentes nuevas¹⁰.

1.4.1.8 Estabilidad. La estabilidad de un asfalto es su capacidad de resistir desplazamientos y deformación bajo las cargas del tránsito.

Un pavimento estable es capaz de mantener su forma y lisura bajo cargas repetidas, un pavimento inestable desarrolla ahuellamiento (canales), ondulaciones (corrugación) y otras señas que indican cambios en la mezcla. Los requisitos de estabilidad solo pueden establecerse después de un análisis completo del tránsito, debido a que las especificaciones de estabilidad para un pavimento dependen del tránsito esperado. Las especificaciones de estabilidad deben ser lo suficiente altas para acomodar adecuadamente el tránsito esperado, pero no más altas de lo que exijan las condiciones de tránsito. Valores muy altos de estabilidad producen un pavimento demasiado rígido y, por lo tanto, menos durable que lo deseado. La estabilidad de una mezcla depende de la fricción y la cohesión interna.

¹⁰ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

La fricción interna en las partículas de agregado (fricción entre partículas) está relacionada con características del agregado tales como forma y textura superficial. La cohesión resulta de la capacidad ligante del asfalto. Un grado propio de fricción y cohesión interna, en la mezcla, previene que las partículas de agregado se desplacen unas respecto a otras debido a las fuerzas ejercidas por el tráfico. En términos generales, entre más angular sea la forma de las partículas de agregado y más áspera sea su textura superficial, más alta será la estabilidad de la mezcla. Cuando no hay agregados disponibles con características de alta fricción interna, se pueden usar mezclas más económicas, en lugares donde se espere tráfico liviano, utilizando agregados con valores menores de fricción interna. La fuerza ligante de la cohesión aumenta con aumentos en la frecuencia de carga (tráfico).

La cohesión también aumenta a medida que la viscosidad del asfalto aumenta, o a medida que la temperatura del pavimento disminuye. Adicionalmente, y hasta cierto nivel, la cohesión aumenta con aumentos en el contenido de asfalto. Cuando se sobrepasa este nivel, los aumentos en el contenido de asfalto producen una película demasiado gruesa sobre las partículas de agregado, lo cual resulta en pérdida de fricción entre partículas existen muchas causas y efectos asociados con una estabilidad insuficiente en el pavimentos¹¹ (véase el Cuadro 1).

Cuadro 1. Causas y Efectos de Inestabilidad en el Pavimento

CAUSAS	EFFECTOS
Exceso de asfalto en la mezcla	Ondulaciones, ahuellamientos y afloramiento o exudación.
Exceso de arena de tamaño medio en la mezcla	Baja resistencia durante la compactación y posteriormente, durante un cierto tiempo; dificultad para la compactación.
Agregado redondeado sin, o con pocas, superficies trituradas	Ahuellamiento y canalización.

Fuente. UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

1.4.1.9 Resistencia a la Fatiga. La resistencia a la fatiga de un pavimento es la resistencia a la flexión repetida bajo las cargas de tránsito.

Se ha demostrado, por medio de la investigación, que los vacíos (relacionados con el contenido de asfalto) y la viscosidad del asfalto tienen un efecto considerable sobre la resistencia a la fatiga. A medida que el porcentaje de vacíos en un pavimento aumenta, ya sea por diseño o por falta de compactación, la resistencia a la fatiga del pavimento. (El periodo de tiempo durante el cual un pavimento en

¹¹ UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

servicio es adecuadamente resistente a la fatiga) disminuye. Así mismo, un pavimento que contiene asfalto que se ha envejecido y endurecido considerablemente tiene menor resistencia a la fatiga. Las características de resistencia y espesor de un pavimento, y la capacidad de soporte de la subrasante, tienen mucho que ver con la vida del pavimento y con la prevención del agrietamiento asociado con cargas de tránsito. Los pavimentos de gran espesor sobre subrasantes resistentes no se flexionan tanto, bajo las cargas, como los pavimentos delgados o aquellos que se encuentran sobre subrasantes débiles¹².

Cuadro 2. Causas y Efectos de una Poca Durabilidad

CAUSAS	EFFECTOS
Bajo contenido de asfalto	Agrietamiento por fatiga
Vacios altos de diseño	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Falta de compactación	Envejecimiento temprano del asfalto, seguido por agrietamiento por fatiga.
Espesor inadecuado de pavimento	Demasiada flexión seguida por agrietamiento por fatiga.

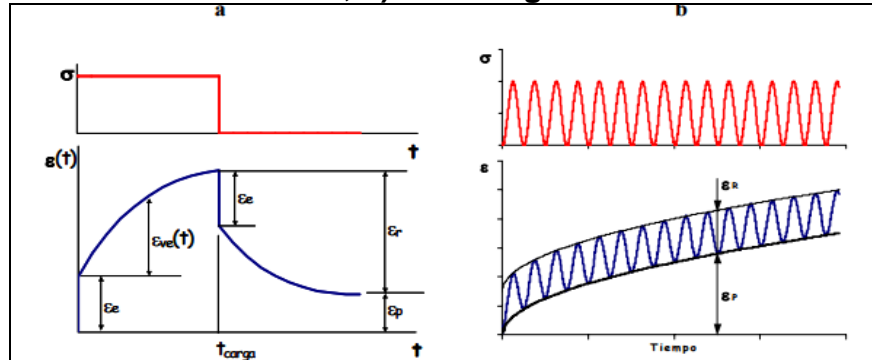
Fuente. UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

1.4.1.10 Comportamiento Plástico de las Mezclas Asfálticas. Las mezclas asfálticas son “materiales visco elásticos cuyas propiedades, dependientes de la temperatura y la frecuencia de aplicación de las cargas, condicionan su posterior comportamiento en servicio. Desde el punto de vista estructural, las propiedades mecánicas más imitantes son el módulo de deformación, la resistencia a la fatiga y la resistencia a las deformaciones permanentes”¹³ (véase la Figura 5).

¹² UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

¹³ ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

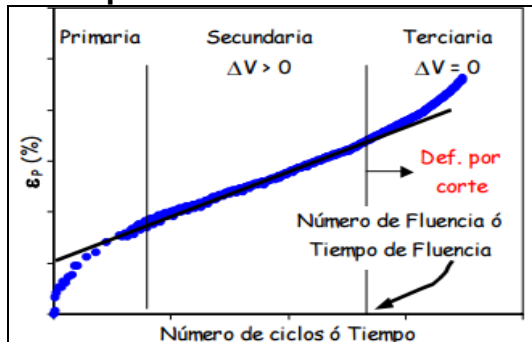
Figura 5. Evolución de la Deformación Permanente para a) Una Carga Estática, b) Una Carga Cíclica



Fuente. ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet:<URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

“La evolución de la deformación durante su vida de servicio se desarrolla en tres fases, una inicial o primaria, que se produce en los primeros ciclos de carga, una secundaria donde la velocidad de deformación es una característica propia de cada mezcla con ligante asfálticos y una terciaria, donde la deformación es a volumen constante y las deformaciones se producen por corte”¹⁴ (véase la Figura 6).

Figura 6. Etapas de la Deformación Permanente



Fuente. ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet:<URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

¹⁴ ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet:<URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

Cuadro 3. Factores que Afectan la Deformación Permanente en las Mezclas Asfálticas

	FACTOR	CAMBIO DEL FACTOR	EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA AL AHUELLAMIENTO
AGREGADO	Textura de la superficial	Lisa a rugoso	Incremento
	Granulometría	Discontinua a continua	Incremento
	Forma	Redondeada a angular	Incremento
	Tamaño	Aumento del tamaño máximo	Incremento
LIGANTE ASFÁLTICO	Stiffness o Módulo de Rigidez	Incremento	Incremento
MEZCLA ASFÁLTICA	Contenido de ligante	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire (no menor al 3%)	Incremento	Disminuye
	Contenido de vacíos en el agregado mineral (VAM) (no menor al 10%)	Incremento	Disminuye
	Método de compactación	Vibratorio o por amasado	Cambio en la estructura
CONDICIONES DE ENSAYO	Temperatura	Incremento	Disminuye
	Estado y Nivel de tensiones	Incremento en la presión de inflado de los neumáticos o el nivel de tensiones	Disminuye
	Presencia de humedad	Seco a saturado	Disminuye si la mezcla es sensible al agua

Fuente. ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet:<URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

Cuadro 4. Influencia de Distintos Factores en los Parámetros de la Deformación Permanente

FACTOR	ϵ_R	ϵ_P	a	b
TEMPERATURA	MUY ALTA	MUY ALTA	MUY ALTA	MODERADA
TENSOR DESVIADOR	MUY ALTA	MUY ALTA	ALTA	NINGUNA
TIPO AGREGADO (*)	NINGUNA	NINGUNA	NINGUNA	NINGUNA
TIPO ASFALTO	MODERADA	MODERADA	ALTA	NINGUNA
% ASFALTO (**)	NINGUNA	NINGUNA	MODERADA	MODERADA
% VACIOS	MODERADA	MODERADA	MODERADA	MODERADA

(*) con precauciones, (**) $\pm 1\%$ alrededor del óptimo

Fuente. ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet:<URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

1.4.1.11 Predicción del Ahuellamiento: Ensayos de Laboratorio. Como se mencionó anteriormente la deformación permanente en mezclas asfálticas es una combinación de densificación (cambio de volumen) y deformación por corte de las mismas bajo la acción de cargas dinámicas provocadas por el tránsito y el clima, y puede ser estimado a través de distintas ecuaciones constitutivas.

Estas relaciones son alimentadas a través de datos obtenidos a partir de distintas líneas de trabajo que pueden complementarse entre sí. Las principales son:

- Pistas de ensayo a escala natural y/o equipamientos especiales sobre rutas reales (equipos simuladores de tránsito pesado) o tramos experimentales.
- La realización de ensayos en el laboratorio y la obtención de los coeficientes de ajuste con respecto al comportamiento real de la estructura.
- Análisis de datos de rutas reales obtenidas del seguimiento periódico de tramos de servicio¹⁵

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para determinar la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica, tratándose de mezclas preparadas en el laboratorio o de testigos procedentes de pavimentos¹⁶.

El ensayo de pista de laboratorio consiste en someter una probeta prismática de mezcla asfáltica, al paso alternativo de una rueda, en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Las probetas, de 30 x 30 x 5 cm, se compactan por vibración. El ensayo se realiza a una temperatura constante de 60° C, haciendo pasar una rueda metálica, de 20 cm de diámetro, dotada de una banda de rodadura de caucho macizo de 5 cm de ancho y 2 cm de espesor, que ejerce una presión de contacto sobre la superficie de la probeta de 900 kN/m². La frecuencia del movimiento de vaivén es de 42 pasadas por minuto, con un recorrido en cada sentido de 23 cm. Durante el ensayo, se determinan las deformaciones totales de la probeta en los minutos 1, 3 y 5 y a continuación cada 5 minutos hasta completar los primeros 45 minutos y cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo¹⁷

Mediante este ensayo de pista de laboratorio se evalúa la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas para pavimentación.

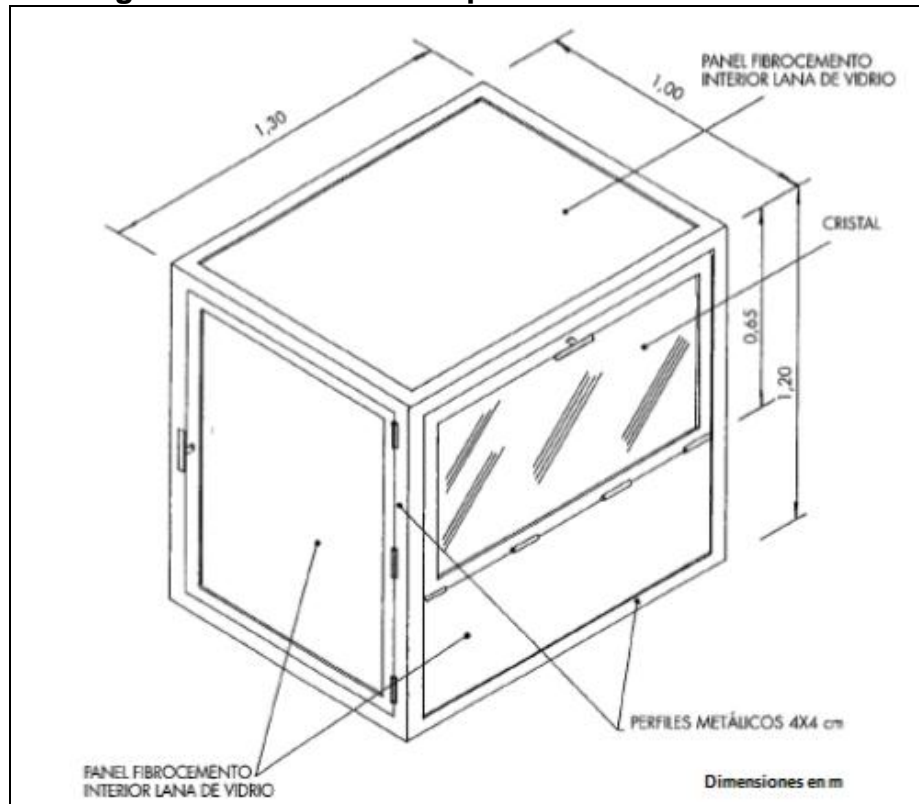
¹⁵ ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

¹⁶ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. INVE – 756. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 1

¹⁷ *Ibíd.*, p. 2

El procedimiento es aplicable, principalmente, a las mezclas asfálticas producidas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tránsito y clima; aunque, variando las condiciones del ensayo también puede ser de utilidad en otros tipos de mezclas (véase la Figura 7).

Figura 7. Cámara de Temperatura Controlada 60°C



Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. INVE – 756. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 11.

1.4.1.12 Susceptibilidad de las Mezclas Asfálticas al Efecto del Agua. Esta norma de ensayo establece un procedimiento para preparar y probar especímenes de concreto asfáltico, con el fin de medir el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta. “El método es aplicable a las mezclas densas y permite evaluar el efecto de la humedad sobre mezclas elaboradas con o sin aditivos mejoradores de adherencia, sean líquidos o sólidos pulverulentos, como la cal hidratada y el cemento Portland”¹⁸.

Este método de ensayo se puede emplear para probar mezclas de concreto asfáltico, junto con los ensayos requeridos para el diseño de la mezcla, para

¹⁸ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. INVE – 725. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 1

establecer el potencial de daño por humedad, así como para determinar si un aditivo mejorador de adherencia es efectivo o no y, en caso de que lo sea, para encontrar la cantidad óptima de éste para maximizar su efectividad. Este método de ensayo se puede usar, también, para evaluar mezclas producidas en planta, con el propósito de calificar la efectividad de los aditivos bajo las condiciones impuestas en servicio.

2. METODOLOGÍA

Para el diseño y la implementación de una capa de mezcla asfáltica como parte de la estructura del pavimento se establecieron criterios de procedimiento y medida de cada uno de los factores y variables que intervienen la trazabilidad y el producto final que se pone al servicio del tránsito, tales criterios pretenden estandarizar y brindar rangos que permitan el análisis del comportamiento físico del pavimento y garanticen una óptima puesta en servicio, tal normatividad permite que se evalúe de manera unificada cada factor o variable de diseño.

Para el objetivo principal de este proyecto de la evaluación de la afectación del nivel de compactación en las mezclas asfálticas, se estableció trabajar bajo criterios establecidos por la normatividad INVIAS, y su serie de normas correspondientes a lo estudiado, por ende se determinó como muestra patrón un diseño óptimo suministrado por la empresa Concescol LTDA, empresa caracterizada por sus altos estándares de calidad en cuanto a mezclas de rodadura se trata.

Para la determinación de valores de cambio con respecto a la generación de vacíos después del proceso de compactación, se cambió el porcentaje de compactación, cambio que permitió establecer las diferencias y qué tan influyente es la mala compactación en la generación de fallas de la capa asfáltica, para ello fue conveniente establecer resultados bajo las normas técnicas de EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13 que permitió analizar el efecto del agua sobre su resistencia a la tracción indirecta, resistencia que se vio afectada por la variación de vacíos producidos por una desmejorada compactación. Adicionalmente se analizó la resistencia a la deformación plástica de una mezcla asfáltica de acuerdo a lo establecido por la norma RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07.

2.1 PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA DE PRUEBA

El material de prueba fue suministrado por la planta de pavimentos Concescol Ltda. Quien amablemente facilitó el material de mezcla MD-12 de rodadura, para determinar la influencia y afectación del agua en las mezclas asfálticas compactadas y su deformación plástica, como material anexo se suministra el diseño de la mezcla.

Para control del material y garantizar el óptimo cumplimiento del material con respecto a su diseño, se realizó una prueba de % de asfalto contenido en la mezcla mediante la norma de ensayo INV E-732-13, así como su determinación de la gravedad específica máxima medida INV E- 735-13

2.2 DETERMINACIÓN CONTENIDO DE ASFALTO Y RICE

Para la determinación del contenido de asfalto se tomaron 3000g de la mezcla asfáltica de prueba logrando determinar que el porcentaje de asfalto es el óptimo suministrado en el diseño Marshall realizado por la empresa que suministro el material de prueba (véase la Figura 8).

Figura 8. Determinación Contenido de Asfalto Mezcla de Prueba



Fuente. Los Autores

Se determinó la gravedad específica máxima medida G_{mm} de acuerdo a la norma INV-E-735, la cual determina el criterio de compactación puesto que son aceptables en estructuras de pavimento a partir del 94% de esta gravedad específica G_{mm} (véase la Figura 9)

Figura 9. Determinación de Gravedad Específica Máxima Medida



Fuente. Los Autores.

2.3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO INV E – 756 – 13

Se realizaron tres probetas calculando las dimensiones necesarias para lograr la densidad requerida para el ensayo, esto se logró programando el compactador mecánico para obtener tal densidad dentro del molde (véase las Figuras 10 y 11).

Figura 10. Molde para Compactación de Probetas de Pista



Fuente. Los Autores.

Figura 11. Programación Compactador Mecánico



Fuente. Los Autores.

Para este estudio se realizaron tres probetas de diferente energía de compactación, de acuerdo a las especificaciones técnicas se determinó tal grado de compactación respecto a la densidad máxima medida (**Gmm**) obtenida en el ensayo RICE (véase la Figura 12).

94% Gmm

92% Gmm

90% Gmm

Figura 12. Probetas para Ensayo de Pista a los Grados de Compactación Especificados



Fuente. Los Autores.

Después del período de enfriamiento de la mezcla, las probetas se introdujeron en un horno a $60 \pm 2^\circ \text{C}$ durante cuatro horas antes de la ejecución del ensayo. Dos horas antes del comienzo del mismo, se conectó el sistema de calefacción de la cámara termostáticamente controlada regulándolo a la temperatura especificada para el ensayo. Transcurrido este tiempo, se sacó la primera probeta del horno, se levantó la rueda, y se fijó el molde con la probeta en los anclajes que lleva el carretón móvil para este fin, sin que la rueda tocara en ningún momento la superficie de la probeta. En estas condiciones se cargó el brazo de soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión especificada, se cerró la cámara y se esperaron cerca de 30 minutos con el objeto de homogeneizar la temperatura del ensayo. Seguidamente, se apoyó la rueda cargada sobre la superficie de la probeta y se puso en marcha el carretón durante tres pasadas completas, para conseguir un asentamiento de la rueda sobre la probeta. A continuación se paró el carretón y, situándolo en el punto de medida del micrómetro, se puso éste en cero. Se cerró entonces la ventana lateral y transcurridos unos cinco minutos se comenzó el ensayo, poniendo en movimiento el carretón durante un período de 120 minutos sin interrupciones o hasta que la deformación alcanzara 15 mm, lo que ocurriera primero, haciendo periódicamente las lecturas correspondientes de la deformación (véase la Figura 13).

Figura 13. Montaje de la Probeta en la Cámara de Temperatura



Fuente. Los Autores

“Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda, y se extrae la probeta ensayada, colocando inmediatamente la siguiente y repitiendo el mismo procedimiento de ensayo”¹⁹ (véase las Figuras 14 y 15).

Figura 14. Vista de Huella Producida por Rueda de Ensayo



Fuente. Los Autores.

Figura 15. Marca de Ahuellamiento en Probeta Critica 90% Gmm



Fuente. Los Autores.

2.3.1 Cálculos. Se determinaron y anotaron las deformaciones totales leídas en el micrómetro en los minutos 1, 3 y 5 contados a partir del comienzo del ensayo. A continuación, “cada 5 minutos hasta completar 45 minutos y, a partir de allí, cada 15 minutos hasta finalizar los 120 minutos de duración del ensayo”²⁰.

“Una vez ensayadas todas las probetas, se calcularon los valores medios de todas las deformaciones de la mezcla y se llevaron a un gráfico en donde se dibujó la curva de deformación de la mezcla”²¹.

¹⁹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. INVE – 756, Op. cit., p. 3

²⁰ *Ibíd.*, p. 3

²¹ *Ibíd.*, p. 3

A partir de “las deformaciones, dt, determinadas en el gráfico, correspondientes a los diferentes tiempos “t” del ensayo”²², se calculó la velocidad de deformación media, correspondiente al intervalo de tiempo t2 /t1 mediante la expresión (véase la Figura 16).

Figura 16. Calculo Velocidad Media de Deformación

$V_{t2}/V_{t1} = \frac{d_{t2} - d_{t1}}{t_2 - t_1}$	
Donde: V_{t2}/V_{t1} :	Velocidad media de deformación, correspondiente al intervalo de tiempo entre t_1 y t_2 , $\mu\text{m}/\text{min}$;
d_{t1} y d_{t2} :	Deformaciones correspondientes a t_1 y t_2 , respectivamente, μm ;
t_1 y t_2 :	Tiempos que dependen del lapso establecido en las especificaciones.

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. INVE – 756. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 14.

2.4 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13

Se prepararon probetas Marshall con grados de compactación diferentes variados por el número de golpes por capa generando así distintas densidades con respecto a la densidad máxima medida Gmm obtenida del ensayo Rice, se preparan series de 75, 72, 68, 64 y 60 golpes por capa, produciendo los siguientes grados de compactación (véase la Figura 17).

- 96.87% Gmm a 75 golpes por cara**
- 95.97% Gmm a 72 golpes por cara**
- 95.60% Gmm a 68 golpes por cara**
- 94.86% Gmm a 64 golpes por cara**
- 91.16% Gmm a 60 golpes por cara**

²² Ibíd., p. 4

Figura 17. Compactación en Equipo Marshall



Fuente. Los Autores

Se determinó la altura de cada espécimen, como se indica en la norma INV E-744.

Se determinó la gravedad específica bulk de los especímenes compactados de acuerdo con la norma INV E-733, y se expresó el volumen de cada espécimen en centímetros cúbicos. El término (B - C) de la norma INV E-733, es el volumen del espécimen, en centímetros cúbicos (cm³) (véase la Figura 18).

Figura 18. Determinación de Masas para Densidad Bulk



Fuente. Los Autores

Se calculó el porcentaje de vacíos con aire respecto del volumen total (% VA) de cada espécimen, de acuerdo con la norma INV E-736, expresando el volumen de aire en centímetros cúbicos (cm³). El volumen de vacíos con aire se calculó multiplicando el volumen total encontrado en el numeral anterior por el porcentaje de vacíos con aire y dividiendo por 100.

Se dividieron los especímenes en dos subgrupos, de tal forma que el promedio de los vacíos con aire en los dos sea aproximadamente igual. Se guardaron a temperatura ambiente el subgrupo a ser probado en seco.

Después de verificar la saturación, se acondicionaron los especímenes parcialmente saturados, sumergiéndolos en un baño de agua destilada a $60 \pm 1.0^\circ \text{C}$ ($140 \pm 1.8^\circ \text{F}$) durante 24 horas (véase la Figura 19).

Figura 19. Sub-grupo de Probetas Llevadas a Inmersión



Fuente. Los Autores.

Se ajustó la temperatura del subgrupo conservado en seco, colocando los especímenes en un baño de agua a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$) durante 20 minutos.

Se determinó la resistencia a la tensión de ambos subgrupos a $25 \pm 1^\circ \text{C}$ ($77 \pm 1.8^\circ \text{F}$). Se colocó un espécimen en el aparato de carga, con las franjas de carga centradas y paralelas sobre el plano diametral vertical. Se aplicó una carga diametral a una tasa de deformación 0 mm/min (véase la Figura 20).

Figura 20. Determinación Resistencia a la Tensión



Fuente. Los Autores.

Se continuó cargando hasta fracturar el espécimen. Una vez desmontado del aparato de ensayo, se abrió el espécimen y se estimó visualmente el daño que le causó la humedad.

Se inspeccionaron todas las superficies, inclusive las caras falladas, buscando evidencia de agregado resquebrajado o roto que pueda haber influido en el resultado de la prueba y se registran las observaciones (véase la Figura 21).

Figura 21. Forma de Falla Probetas Marshall



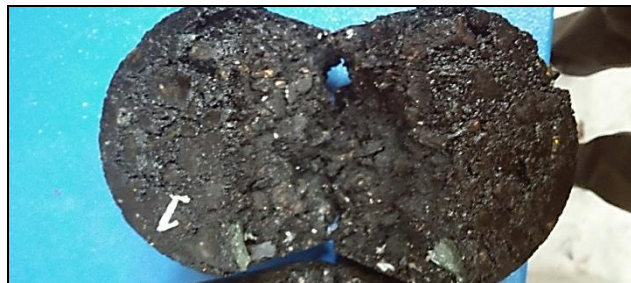
Fuente. Los Autores.

Figura 22. Evaluación de Falla a un Grupo Seco y Saturado



Fuente. Los Autores.

Figura 23. Evaluación de Falla en una Probeta en Inmersión



Fuente. Los Autores.

Figura 24. Evaluación de Falla en una Probeta en Seco



Fuente. Los Autores.

Se calcula la resistencia a la tensión (RT) como sigue (véase la Figura 25).

Figura 25. Fórmula para Calcular la Resistencia a la Tensión

$$R_T = \frac{2000 \times P}{\pi \times t \times D} \quad [725.4]$$

Donde: R_T : Resistencia a la tensión, kPa;

P : Carga máxima, N;

t : Altura del espécimen inmediatamente antes de la prueba, mm;

D : Diámetro del espécimen, mm.

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. INVE – 725. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 8

Si la carga máxima se expresa en lbf y la altura y el diámetro del espécimen en pulgadas, la resistencia a tensión, en lb/pg2, se determina con la fórmula (véase la Figura 26).

Figura 26. Resistencia a Tensión

$$R_T = \frac{2 \times P}{\pi \times t \times D} \quad [725.5]$$

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. INVE – 725. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 8

Se calcula la relación de resistencias a tensión, como sigue (véase la Figura 27).

Figura 27. Cálculo Relación de Resistencias a Tensión

$$RRT = \left[\frac{R_{TH}}{R_{TS}} \right] \times 100 \quad [725.6]$$

Donde: RRT: Relación de resistencias a la tensión, %;

R_{TH} : Resistencia promedio a la tensión, del subgrupo acondicionado al agua;

R_{TS} : Resistencia promedio a la tensión del subgrupo mantenido en seco.

Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. INVE – 725. Bogotá: INVIAS, 2007. p. 9.

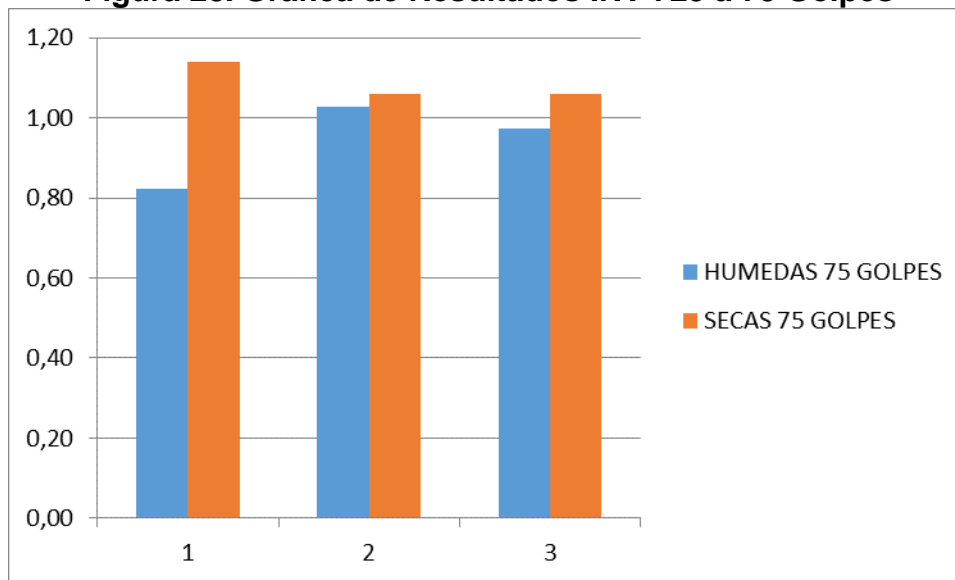
3. INSTALACIONES Y EQUIPO REQUERIDO

Debido a la complejidad de los estudios requeridos es necesario realizar los ensayos en las instalaciones de un laboratorio comercial BATEMAN INGENIERIA LTDA Y CONCRESERVICIOS S.A.S, que nos brindan la oportunidad de disponer con previo acuerdo en un tiempo determinado de los equipos necesarios para la determinación de las variables a estudiar, tales como Maquina compresión y equipo de compactación Marshall INV E – 748 – 13, Maquina de compresión y equipo de compactación para la tracción indirecta INV E – 725 – 13, cámara de ensayo y equipo de compactación de pista para probetas de asfalto I.N.V. E – 756 – 07. Además estos equipos nos brindan una mayor precisión debido a su calibración ya que en ellos se trabaja habitualmente con muestras del mercado que exigen un alto de calidad.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

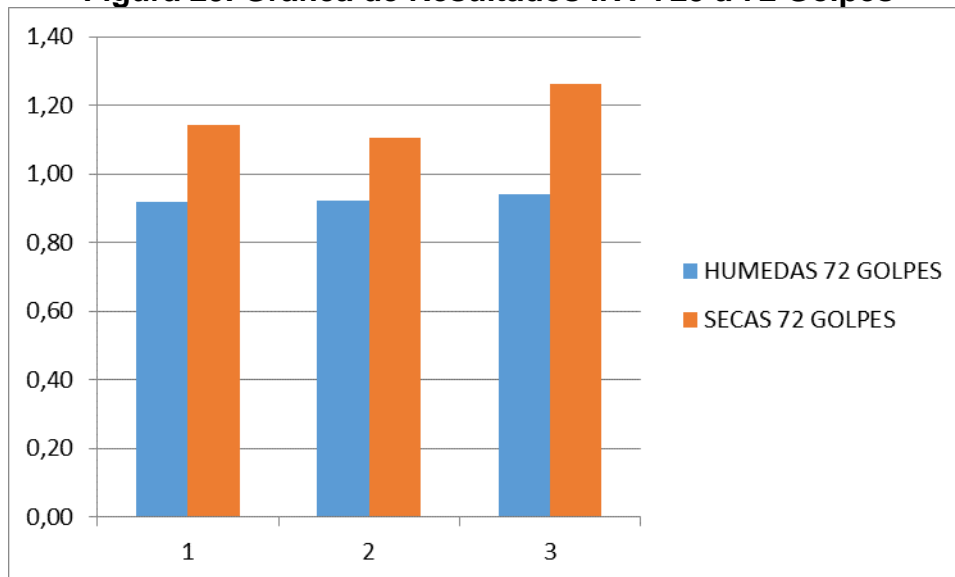
Una vez realizados los respectivos ensayos se obtuvieron los siguientes resultados en primer lugar del ensayo de la susceptibilidad al agua (véase las Figuras 28, 29, 30, 31 32, y 33 y el Cuadro 5).

Figura 28. Grafica de Resultados INV 725 a 75 Golpes



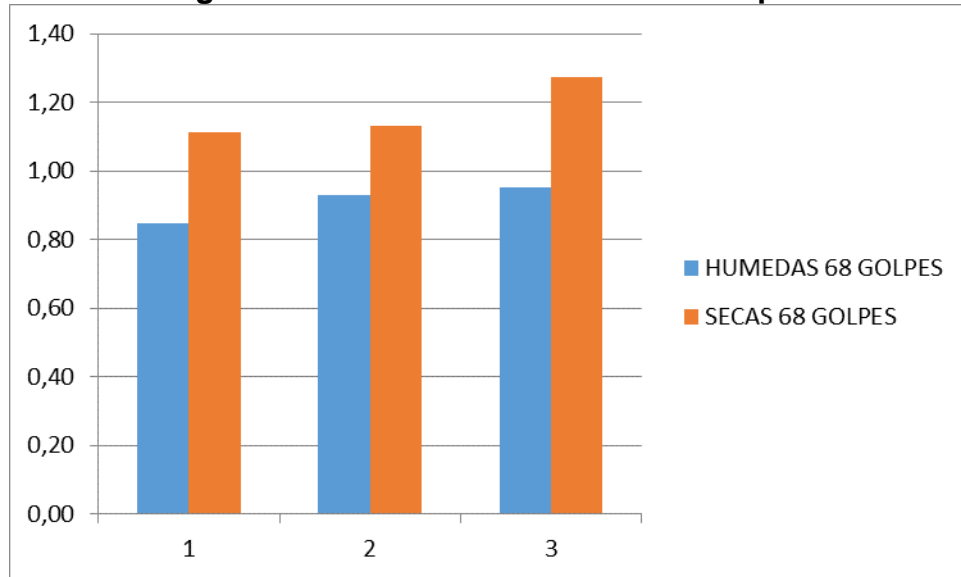
Fuente. Los Autores.

Figura 29. Grafica de Resultados INV 725 a 72 Golpes



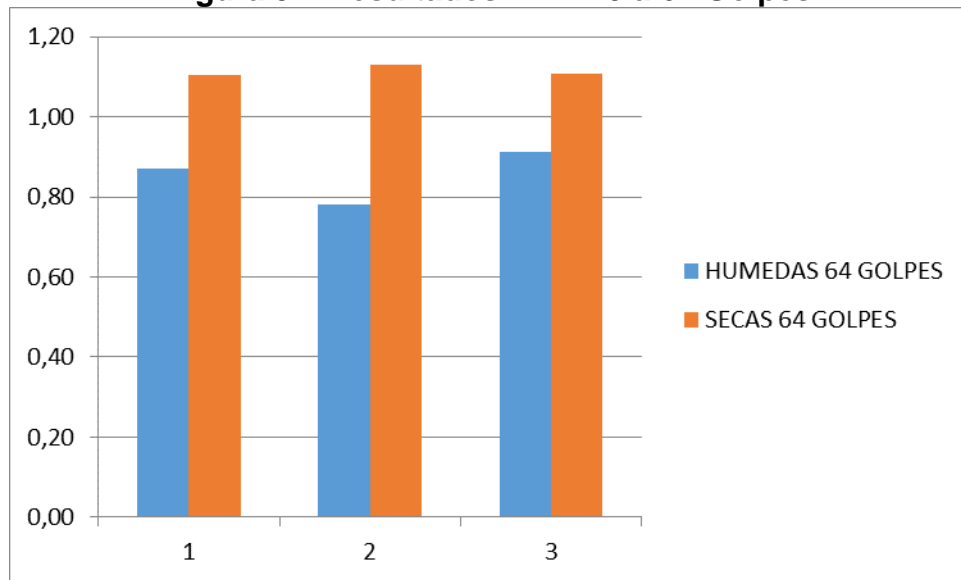
Fuente. Los Autores.

Figura 30. Resultados INV 725 a 68 Golpes



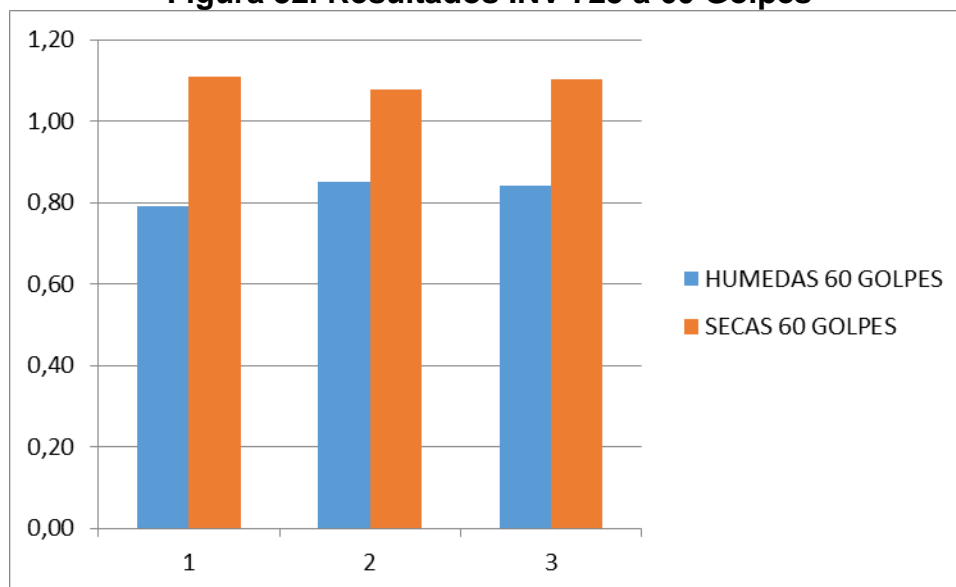
Fuente. Los Autores.

Figura 31. Resultados INV 725 a 64 Golpes



Fuente. Los Autores.

Figura 32. Resultados INV 725 a 60 Golpes



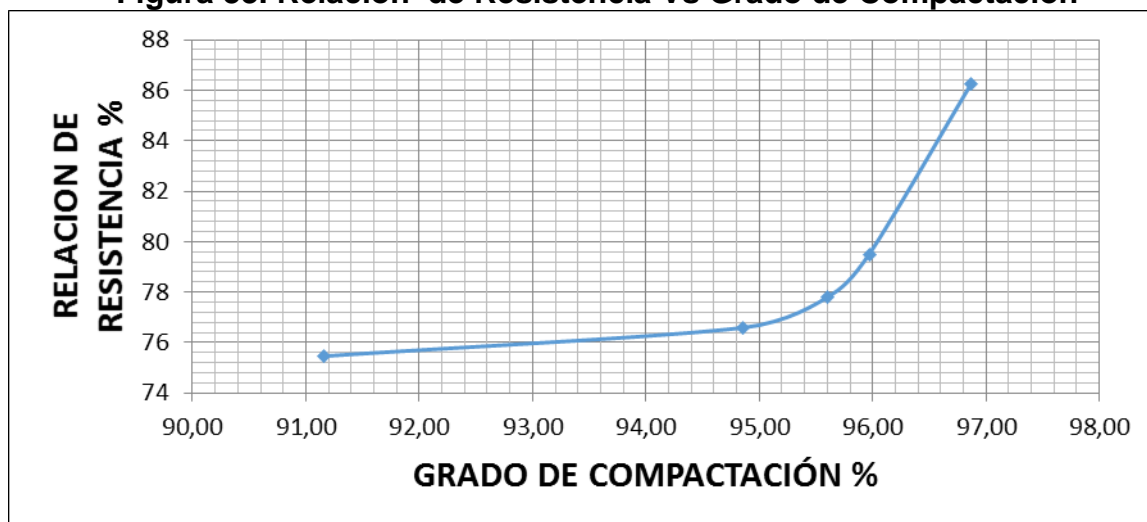
Fuente. Los Autores.

Cuadro 5. Resultados Promedio Resistencia a Tensión INV 725

	HUMEDA	SECA	RELACION DE RESISTENCIA (%)	GRADO DE COMPACTACION (%)
PROMEDIO RESISTENCIA A LA TENSIÓN (kPa) 75 GOLPES	0.94	1.09	86.24%	96.87
PROMEDIO RESISTENCIA A LA TENSIÓN (kPa) 72 GOLPES	0.93	1.17	79.49%	95.97
PROMEDIO RESISTENCIA A LA TENSIÓN (kPa) 68 GOLPES	0.91	1.17	77.78%	95.60
PROMEDIO RESISTENCIA A LA TENSIÓN (kPa) 64 GOLPES	0.85	1.11	76.58%	94.86
PROMEDIO RESISTENCIA A LA TENSIÓN (kPa) 60 GOLPES	0.83	1.10	75.45%	91.16

Fuente. Los Autores.

Figura 33. Relación de Resistencia Vs Grado de Compactación



Fuente. Los Autores.

De los resultados obtenidos se resalta la relación de resistencia contra el grado de compactación, que permite apreciar que efectivamente las probetas sometidas a la humedad tuvieron una menor resistencia que las que no se sometieron a la humedad y que el grado de compactación es un factor muy importante en su resistencia pues a medida que la compactación es menor así mismo disminuye la relación de la resistencia.

Posterior al ensayo de susceptibilidad al agua se ejecutó el ensayo de resistencia a la deformación plástica mediante la pista de ensayo obteniéndose los siguientes resultados (véase los Cuadros 6, 7 y 8 y las Figuras 34 y 35).

Cuadro 6. Resultados Ensayo INV 756

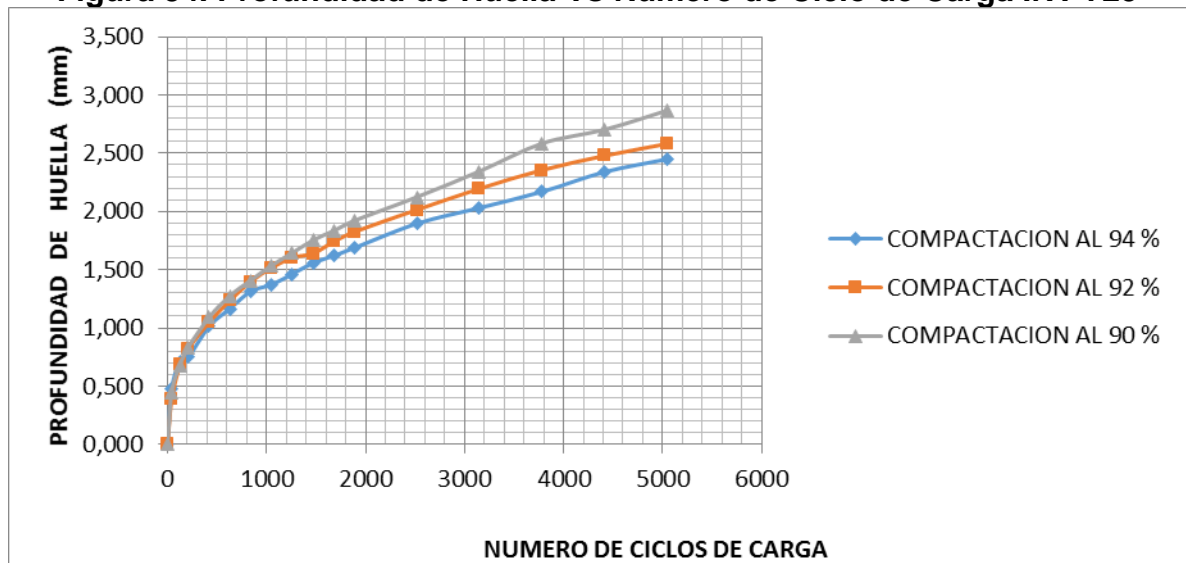
		PROBETA 94%	PROBETA 92%	PROBETA 90%
MOLDE No		M-0834	M-0428	M-0680
TEMPERATURA DE COMPACTACIÓN (C°)		140	140	140
ENFRIAMIENTO PROBETA	FECHA Y HORA INICIO	01/11/2016 13:00	01/11/2016 14:30	01/11/2016 16:00
	FECHA Y HORA FIN	02/11/2016 14:00	02/11/2016 15:30	02/11/2016 16:30
MASA PROBETA SECA (g)		10636	10408	10186
VOLUMEN (cm3)		4651	4651	4651
DENSIDAD (g/cm3)		2.287	2.238	2.190
TEMPERATURA ENSAYO EN PISTA (°C)		60	60	60

Cuadro 6. (Continuación)

CALENTAMIENTO A 60+/-2 °C ANTES DE ENSAYO Y HOMOGENIZACIÓN	HORA INICIO	4:00		8:00		10:00	
	HORA INICIO	8:00		12:00		14:00	
	No CICLOS	TIEMPO (min)	DEFORMACIÓN (mm)	TIEMPO (min)	DEFORMACIÓN (mm)	TIEMPO (min)	DEFORMACIÓN (mm)
	0	0	0.000	0	0.000	0	0.000
	42	1	0.475	1	0.387	1	0.448
	126	3	0.711	3	0.682	3	0.681
	210	5	0.748	5	0.821	5	0.832
	420	10	1.013	10	1.047	10	1.089
	630	15	1.164	15	1.235	15	1.273
	840	20	1.313	20	1.396	20	1.406
	1050	25	1.370	25	1.516	25	1.533
	1260	30	1.463	30	1.601	30	1.642
	1470	35	1.557	35	1.638	35	1.751
	1680	40	1.619	40	1.741	40	1.832
	1890	45	1.688	45	1.824	45	1.919
	2520	60	1.896	60	2.014	60	2.122
	3150	75	2.031	75	2.195	75	2.342
	3780	90	2.169	90	2.354	90	2.581
	4410	105	2.339	105	2.477	105	2.699
	5040	120	2.448	120	2.579	120	2.863

Fuente. Los Autores.

Figura 34. Profundidad de Huella Vs Número de Ciclo de Carga INV 725



Fuente. Los Autores

Cuadro 7. Velocidades de Deformación-Tasa de Ahuellamiento

RESULTADOS AHUELLAMIENTO	PROBETA COMPACTADA AL 94 %	PROBETA COMPACTADA AL 92 %	PROBETA COMPACTADA AL 90 %
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V30/45 mm/min	0.0150	0.0149	0.0185
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V75/90 mm/min	0.0092	0.0106	0.0159
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V105/120 mm/min	0.0073	0.0068	0.0109
PROFUNDIDAD DE AHUELLAMIENTO (mm)	2.448	2.579	2.863
TASA DE AHUELLAMIENTO mm/ciclo	0.00039	0.00044	0.00048

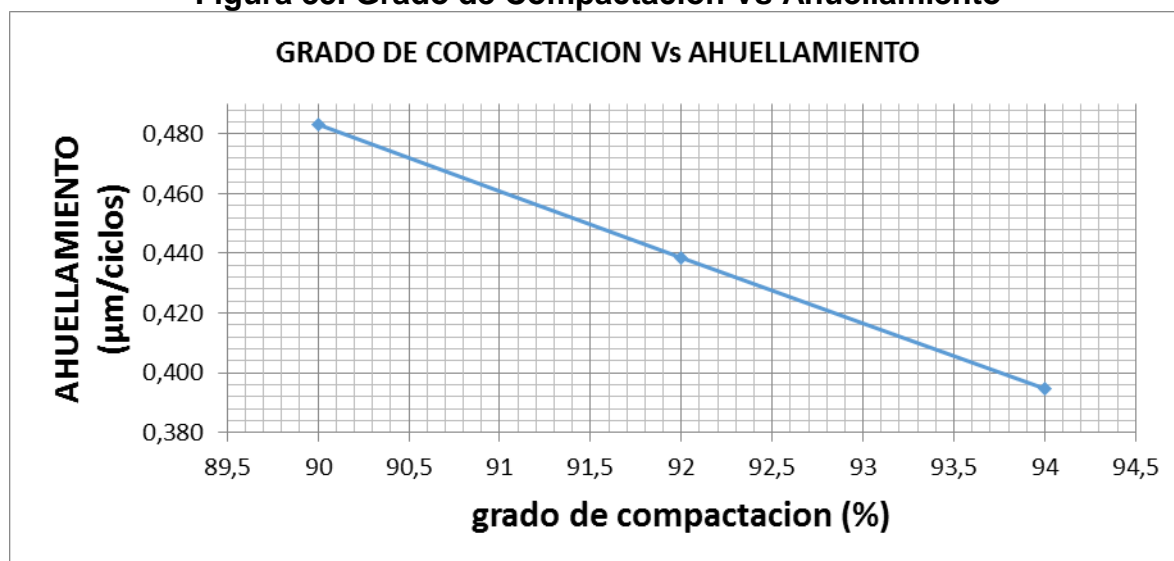
Fuente. Los Autores.

Cuadro 8. Velocidades de Deformación-Tasa Ahuellamiento

RESULTADOS AHUELLAMIENTO	PROBETA COMPACTADA AL 94 %	PROBETA COMPACTADA AL 92 %	PROBETA COMPACTADA AL 90 %
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V30/45 mm/min	0.0150	0.0149	0.0185
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V75/90 mm/min	0.0092	0.0106	0.0159
VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN V105/120 m/min	0.0073	0.0068	0.0109
PROFUNDIDAD DE AHUELLAMIENTO (mm)	2.4480	2.579	2.8630
TASA DE AHUELLAMIENTO mm/ciclo	0.00039	0.00044	0.00048
TASA DE AHUELLAMIENTO $\mu\text{m}/\text{ciclo}$	0.395	0.439	0.483

Fuente. Los Autores

Figura 35. Grado de Compactación Vs Ahuellamiento



Fuente. Los Autores.

Los resultados obtenidos del ensayo en pista al igual que los resultados de la susceptibilidad al agua coinciden en confirmar que el grado de compactación es un factor primordial en la calidad y el comportamiento de una capa de pavimento flexible. Entre la probeta compactada al 94% y la compactada al 90% llego a generar una diferencia en la huella de 0.415mm.

El comportamiento de la huella en cada uno de los ciclo tuvo la misma tendencia, reflejando una gráfica del mismo estilo pero los valores de la huella son los que variaron en cada ciclo, es decir que el comportamiento de la huella es el mismo pero la compactación influyó directamente en la magnitud de la huella generada.

Con la información anteriormente descrita y los datos del laboratorio se analizó la ilustración 35, que relaciona el ahuellamiento Vs el grado de compactación, la gráfica es de tipo lineal y los datos son inversos, a mayor ahuellamiento menor grado de compactación y a menor huella mayor grado de compactación.

5. PRESUPUESTO DEL TRABAJO Y RECURSOS FINANCIEROS

A continuación se presenta el presupuesto del trabajo y los recursos financieros (véase el Cuadro 9).

Cuadro 9. Presupuesto del Trabajo y Recursos Financieros

ACTIVIDAD	DURACION (DIAS)	UNIDAD	VALOR UNITARIO	N° DE INGENIEROS	VALOR TOTAL
1, COSTOS DIRECTOS					
1,1 ELABORACION ANTE-PROYECTO					
1,1,1 Presentacion preopuesta ante-proyecto	15	Und	\$ 50.000	2	\$ 1.500.000
1,1,2 Entrega de proyecto	1	Und	\$ 50.000	1	\$ 50.000
VALOR TOTAL					\$ 1.550.000
1,2 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION TEORICA					
1,2,1 investigacion Bibliografica	2	Und	\$ 50.000	1	\$ 100.000,00
1,2,2 Procesamiento y analisis de datos	2	Und	\$ 50.000	2	\$ 200.000,00
VALOR TOTAL					\$ 300.000,00
1,3 ENTREGAS PARCIALES DE LA MUESTRA PATRON					
1,3,1 Determinacion de la Estabilidad Marshall para % optimo de asfalto	8	Und	\$ 130.000	2	\$ 2.080.000
1,3,2 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13	8	Und	\$ 90.000	2	\$ 1.440.000
1,3,3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07.	3	Und	\$ 450.000	2	\$ 2.700.000
VALOR TOTAL					\$ 6.220.000
1,4 ENTREGAS PARCIALES DE LA SUB-MUESTRA % OPTIMO ASFALTO Y 95% COMPACTACION					
1,4,1 Determinacion de la Estabilidad Marshall	8	Und	\$ 90.000	2	\$ 1.440.000
1,4,2 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13	8	Und	\$ 90.000	2	\$ 1.440.000
1,4,3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07.	3	Und	\$ 450.000	2	\$ 2.700.000
VALOR TOTAL					\$ 5.580.000
1,5 ENTREGAS PARCIALES DE LA SUB-MUESTRA % OPTIMO ASFALTO Y 90% COMPACTACION					
1,5,1 Determinacion de la Estabilidad Marshall	8	Und	\$ 90.000	2	\$ 1.440.000
1,5,2 EVALUACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD AL AGUA DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO ASFÁLTICO UTILIZANDO LA PRUEBA DE TRACCIÓN INDIRECTA INV E – 725 – 13	8	Und	\$ 90.000	2	\$ 1.440.000
1,5,3 RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07.	3	Und	\$ 450.000	2	\$ 2.700.000
VALOR TOTAL					\$ 5.580.000
TOTAL COSTOS DIRECTOS					\$ 19.230.000
2, COSTOS INDIRECTOS					
2,1 Administracion 3%					\$ 576.900
2,2 Imprevistos 2%					\$ 384.600
2,3 Utilidad 5%					\$ 961.500
2,4 IVA 16%					\$ 3.076.800
TOTAL COSTOS INDIRECTOS					\$ 4.999.800
COSTO TOTAL DEL PROYECTO					\$ 24.229.800

Fuente. Los Autores

6. CONCLUSIONES

- La puesta en práctica de los ensayos de susceptibilidad a la humedad y la deformación permanente, a la muestra de pavimento flexible con variaciones en su nivel de compactación, ha permitido analizar de manera más clara y directa, con evidencias reales, que efectivamente se presenta una desmejora notable en el óptimo desempeño de los pavimentos flexibles que fueron compactados por debajo de los niveles solicitados.
- En el desarrollo del proyecto se pudo ver como se afectan las propiedades del pavimento, y sus comportamientos frente a factores externos tienden a la desmejora del mismo. Se Logró encontrar resultados muy interesantes y que permitieron realizar un análisis detallado de las consecuencias de la compactación a menor grado de la recomendada.
- Afortunadamente el desarrollo de los ensayos se logró ejecutar con alta precisión, lo que garantiza obtener datos fidedignos y confiables, para llegar a conclusiones y análisis de los respectivos resultados.
- La experiencia también ha permitido obtener graficas con datos precisos que dan información acerca de los rangos en los cuales el pavimento sometido a la humedad o a la deformación, logra continuar con su resistencia esperada y cumpliendo con su óptimo desempeño, así como también los rangos en los cuales el pavimentos estaría viéndose afectado ya en gran medida por los mismos factores.
- De los grados de compactación analizados y los resultados de cada ensayo ejecutado podemos concluir que para obtener una relación de resistencia mayor al 80% únicamente la compactación al 96.87 cumplió y realizando la relación en la gráfica los grados de compactación mayores al 96.1% cumplirían esa condición.
- Para el ensayo en pista, los ahuellamiento obtenidos son claros al depender del grado de compactación, aunque la diferencia en los valores no es muy significativa, y teniendo en cuenta que la norma no establece profundidades máximas, aclaramos que la compactación es fundamental para evitar el ahuellamiento del pavimento y la mejor practica es garantizar los valores mínimos de compactación.

7. RECOMENDACIONES

- El desarrollo de los ensayos debe realizarse ceñido a las indicaciones de las normas de INVIAS y se debe procurar en lo posible contar con equipos de excelente desempeño, que garanticen la calidad de los resultados, pues es importante tener en cuenta que la variación en la cantidad de golpes puede no ser determinante si las mediciones no se realizan con detalle.
- Se recomienda que la compactación de las probetas para el ensayo de susceptibilidad a la humedad, sea realizada por una misma persona con el fin de evitar cambios en la energía aplicada y variar los resultados del ensayo.
- En el desarrollo del proyecto, se presentaron incidentes de disponibilidad de tiempo tanto del material humano utilizado como de las instalaciones del laboratorio, por lo que recomendamos planificar de manera adecuada el tiempo que se va a requerir para el desarrollo de cada actividad, debido a que los tiempos de cada ensayo pueden variar según la experticia de quienes los ejecutan y en caso de presentarse algún imprevisto como por ejemplo el daño de algún equipo, ese tiempo retardaría aún más todo el ensayo.
- Este proyecto puede continuarse en futuros trabajos de investigación, en vista de la gran variedad que se puede obtener en sus propiedades, variedades de granulometría, cambios en la temperatura de compactación, cambios en el porcentaje de asfalto etc. Así mismo se pueden incluir ensayos que la norma INVIAS nos solicita en los pavimentos flexibles y de ese modo lograr tener un contexto más amplio de la variación en distintas condiciones de los pavimentos flexibles.

BIBLIOGRAFÍA

ANGELONE, Silvia; MARTÍNEZ, Fernando; SANTAMARÍA, Enrique; GAVILÁN, Emiliano y CAUHAPÉ, Marina. Deformación Permanente de Mezclas Asfálticas [en línea]. Rosario: Universidad de Rosario [citado 15 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <https://es.scribd.com/document/277468917/DEFORMACION-PERMANENTE-ASFALTOS-pdf>>

CONSTRUMATICA. Aplicación de Mezclas Bituminosas [en línea]. Bogotá: La Empresa [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: http://www.construmatica.com/construpedia/Aplicaci%C3%B3n_de_Mezclas_Bituminosas>

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS. Evaluación de la susceptibilidad al agua de las mezclas asfálticas compactadas utilizando la prueba de tracción indirecta. INVE – 725. Bogotá: INVIAS, 2007. 10 p.

------. Resistencia a la deformación plástica de las mezclas asfálticas mediante la pista de ensayo de laboratorio. INVE – 756. Bogotá: INVIAS, 2007. 15 p.

REVISTA DINERO. Solo el 15% de las carreteras colombianas están pavimentadas [en línea]. Bogotá: La Revista [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://www.dinero.com/pais/articulo/estudio-sobre-infraestructura-colombia-2014/203641>>

UNIVERSIDAD DE PIURA. Diseño de mezclas asfálticas [en línea]. Lima: La Universidad [citado 10 agosto, 2017]. Disponible en Internet: <URL: http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_130_181_83_1181.pdf>

YEPES PIQUERAS, Víctor. La compactación de las mezclas asfálticas [en línea]. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia [citado 10 agosto, 2016]. Disponible en Internet: <URL: <http://victoryepes.blogs.upv.es/2016/02/18/la-compactacion-de-las-mezclas-asfalticas/>>