
**EFFECTOS DE LAS ARENAS DE TRITURACION Y DE RIO EN LA
DEFORMACION PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN
CALIENTE CON ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO**

LUIS GABRIEL PEÑA ACOSTA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**EFFECTOS DE LAS ARENAS DE TRITURACION Y DE RIO EN LA
DEFORMACION PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN
CALIENTE CON ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO**

**Proyecto de Grado para optar el Título de
Ingeniero Civil**

**LUIS GABRIEL PEÑA ACOSTA
CÓD. 21 - 2040194**

**Director del Proyecto:
Ing. Ph D. EDUARDO CASTAÑEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2010

*Este trabajo se lo dedico
a Dios, por permitirme alcanzar esta meta
a mis padres Luis Francisco y Gladys, que han puesto
gran parte de su vida para mi bienestar y superación
a mis hermanos Edgar y Fabiola, por su apoyo
Incondicional para la consecución de este trabajo.*

Luis Gabriel

AGRADECIMIENTOS

Hago un pequeño reconocimiento plasmado en este escrito con los nombres de las personas que de alguna forma me prestaron su ayuda sin esperar nada a cambio.

Director del proyecto, ingeniero Eduardo Castañeda, por su incondicional orientación para mi crecimiento y desarrollo profesional.

Ingeniero Edgar Peña, Jefe del laboratorio CORASFALTOS, por permitirme usar sus equipos e instalaciones físicas.

A Juliana niño por su interminable amistad y colaboración en este proyecto.

A Ivan Paba, Ricardo Carreño, Diego Gómez, Neyer Bareño, Darwin guerrero laboratoristas de CORASFALTOS.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS	22
1.1.OBJETIVO GENERAL	22
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
2. MARCO TEÓRICO	23
2.1.DEFORMACIONES PERMANENTES	23
2.1.1. DEFORMACIÓN EN MATERIALES GRANULARES	24
2.1.2. DEFORMACIÓN EN CAPAS TRATADAS CON ASFALTO	27
2.2.PROGRESION DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	28
2.3.CLASIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	30
2.3.1. SEGÚN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL	30
2.3.1.1. DEFORMACIÓN ELÁSTICA	31
2.3.1.2. DEFORMACIÓN POR CONSOLIDACIÓN	31
2.3.1.3. DEFORMACIÓN PLÁSTICA	31
2.3.1.4. DEFORMACIÓN MECÁNICA	31
2.3.2. SEGÚN LA LOCALIZACIÓN DE LA FALLA	32
2.3.2.1. RODERAS POR FALLAS EN LA SUBRASANTE	32
2.3.2.2. RODERAS POR FALLAS EN LA CAPA DEL PAVIMENTO	33
2.3.3. SEGÚN LA PROFUNDIDAD DE LA HUELLA	33
2.4.FACTORES QUE AFECTAN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	34
2.4.1. AGREGADOS MINERALES	34
2.4.1.1. GRADACIÓN	35
2.4.1.2. TEXTURA DE LA SUPERFICIE	35
2.4.1.3. FORMA	36
2.4.1.4. TAMAÑO	37
2.4.1.5. INFLUENCIA DE LA MINERALOGÍA	38
2.4.2. MEZCLA ASFÁLTICA	39

2.4.2.1. LIGANTE ASFÁLTICO (BINDER)	39
2.4.2.1.1. TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO.....	39
2.4.2.1.2. CONTENIDO DE LIGANTE ASFÁLTICO	40
EN LAS PROPIEDADES DEL LIGANTE ASFÁLTICO	40
2.4.2.2. POLVO MINERAL (FILLER).....	40
2.4.2.3. CANTIDAD DE VACÍOS (AIRE)	41
2.4.2.4. VMA: VACÍOS EN EL AGREGADO MINERAL	42
2.4.2.5. COMPACTACIÓN	44
2.4.3. MODIFICADORES ASFÁLTICOS.....	45
2.4.3.1. EMPLEO DE POLÍMEROS	45
2.4.3.2. DIFERENCIAS ENTRE EL ASFALTO MODIFICADO CON POLÍMERO Y EL ASFALTO CONVENCIONAL.	46
2.4.3.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ASFALTOS MODIFICADOS CON POLÍMEROS.....	47
2.4.3.3.1. VENTAJAS	47
2.4.3.3.2. DESVENTAJAS	48
3. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LA DEFORMACION PERMANENTE EN MEZCLAS ASFALTICAS.	49
3.1.RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07.....	49
3.1.1. EQUIPO DE ENSAYO	49
3.1.2. MODO DE PRUEBA	50
3.1.3. CONDICIONES DE ENSAYO	51
3.1.3.1. TEMPERATURA DE ENSAYO.....	51
3.1.3.2. PRESIÓN DE CONTACTO DE LA RUEDA.....	51
3.1.3.3. EJECUCIÓN DEL ENSAYO.....	52
3.1.4. RESULTADOS.....	52
3.2.METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE DE MEZCLAS BITUMINOSAS SUJETAS A CARGA REPETIDA (BS- 226)	53
3.2.1. EQUIPO DE ENSAYO	53
3.2.2. MODO DE PRUEBA	54

3.2.3. MUESTRAS DE ANALISIS	55
3.2.3.1. PREPARACIÓN	55
3.2.3.2. LAS CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO	55
3.2.3.3. ACONDICIONAMIENTO Y PRUEBAS TEMPERATURA	55
3.2.4. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN	56
3.2.5. CALCULO DE LA DEFORMACIÓN AXIAL	56
3.2.6. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	57
3.3. ENSAYO DE RUEDA CARGADA DEL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFALTICOS (A.P.A.)	57
3.3.1. MODO DE PRUEBA	58
3.3.2. VENTAJAS.....	59
3.4. ENSAYO DE RODERAS FRANCES	59
3.4.1. MODO DE PRUEBA	60
3.4.2. VENTAJAS.....	62
3.4.3. LIMITACIONES.....	62
3.5. ENSAYO DE PISTA DE LA UNIVERSIDAD PURDUE	62
3.5.1. MODO DE PRUEBA	63
3.5.2. VENTAJAS.....	63
3.6. ENSAYO DEL MODELO MOVIL DE SIMULACION DE CARGA.....	64
3.6.1. MODO DE PRUEBA	64
3.6.2. VENTAJAS.....	66
4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION.....	67
4.1. CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICAS DE LAS MUESTRAS DE ASFALTOS.....	68
4.1.1. GENERALIDADES.....	68
4.1.2. RESULTADOS.....	68
4.2. CARACTERIZACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS.....	70
4.2.1. GENERALIDADES.....	70
4.2.2. RESULTADOS.....	70
4.3. PREPARACION DE PROBETAS POR LA METODOLOGIA MARSHALL	73
4.3.1. MEZCLA DE LOS AGREGADOS PÉTREOS	73
4.3.1.1. GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO	73

4.3.1.2. MEZCLA DEL AGREGADO GRANULAR CON LOS REQUERIMIENTOS DE LA FRANJA MEDIA PARA UNA MEZCLA MDC-2.....	74
4.3.1.3. DEFINICIÓN DE LAS MEZCLAS MDC-2 PARA 5 COMBINACIONES DE ARENA DE RÍO Y TRITURACIÓN Y 3 TIPOS DE ASFALTO.	76
4.3.1.4. CANTIDADES DE MATERIAL PARA LA PREPARACIÓN DE LA MEZCLA MDC-2.....	77
4.3.2. MEZCLA ASFÁLTICA.....	78
4.3.2.1. CANTIDAD DE MATERIALES.....	78
4.3.2.2. PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS.....	78
4.3.2.3. COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS.....	79
4.3.2.5. CALCULO DE ESTABILIDAD Y FLUJO.....	82
4.3.3. COMPACTACIÓN GIRATORIA SUPERPAVE.....	83
4.3.3.1. COMPACTACIÓN DE LAS PROBETAS DE PRUEBA (GIROS).....	83
4.3.3.2. COMPACTACIÓN DE LAS BRIQUETAS DEFINITIVAS (ALTURA).....	87
4.4.CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE (BS – 226).....	90
5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	92
6. CONCLUSIONES.....	98
7. RECOMENDACIONES.....	100
8. ANEXOS.....	101
BIBLIOGRAFÍA.....	116
INFOGRAFÍA.....	117

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. DEFORMACIONES PLÁSTICAS EN LA VÍA	23
FIGURA 2. DEFORMACIÓN PERMANENTE EN PAVIMENTOS	24
FIGURA 3. DEFORMACIÓN PERMANENTE (RODERA)	28
FIGURA 4. RODERA EN UN PAVIMENTO EN SERVICIO.....	28
FIGURA 5. RODERAS POR FALLAS EN LA SUBRASANTE	32
FIGURA 6. RODERAS POR FALLAS EN LAS CAPAS ASFÁLTICAS	33
FIGURA 7. EFECTO DE LA ANGULARIDAD DEL AGREGADO Y EL CONTENIDO DE VACÍOS EN LA RIGIDEZ A COMPRESIÓN DE UNA MEZCLA	36
FIGURA 8. EFECTO DE LA ANGULARIDAD DEL AGREGADO Y RIGIDEZ DEL BITUMEN.....	37
FIGURA 9. MAQUINA DE ENSAYO.....	50
FIGURA 10. CÁMARA DE TEMPERATURA CONTROLADA	50
FIGURA 11. EQUIPO N.A.T.	53
FIGURA 12. ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (A.P.A.)	57
FIGURA 13. EVALUACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PERMANENTE EN EL A.P.A.....	58
FIGURA 14. MÁQUINA DE ENSAYO LCPC	60
FIGURA 15. ACERCAMIENTO DE LA LLANTA Y LA PLACA EN EL ENSAYO DE RODERA FRANCÉS	62
FIGURA 16. MÁQUINA DE ENSAYO, LABORATORIO DE LA UNIVERSIDAD PURDUE.....	63
FIGURA 17. MODELO MÓVIL DE SIMULACIÓN DE CARGA	65
FIGURA 18. MATERIAL PÉTREO EXTENDIDO AL SOL	73
FIGURA 19. MATERIAL PÉTREO TAMIZADO	74

FIGURA 20. COMBINACIÓN DE AGREGADOS PÉTREOS PARA UNA MEZCLA DE LA FRANJA MEDIA DE MDC-2.....	78
FIGURA 21. ELABORACIÓN DE LA MEZCLA.....	79
FIGURA 22. ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA MÁXIMA TEÓRICA (GMM).....	80

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
GRÁFICA 1. ACUMULACIÓN DE DEFORMACIÓN CON EL NÚMERO DE CICLOS EN MATERIALES GRANULARES	25
GRÁFICA 2. ACUMULACIÓN DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA BAJO CARGA REPETIDA	26
GRÁFICA 3. ACUMULACIÓN DE DEFORMACIÓN PERMANENTE DE UN MATERIAL GRANULAR SUJETO A CARGA CÍCLICA.....	26
GRÁFICA 4. EFECTO DEL NÚMERO DE RODADAS EN EL PERFIL TRANSVERSAL DE LA SUPERFICIE DEL PAVIMENTO.....	29
GRÁFICA 5. TENDENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE SEGÚN EL CONTENIDO	42
DE ASFALTO Y VACÍOS DE AIRE	42
GRÁFICA 6. CURVAS DE GRADACIÓN	43
GRÁFICA 7. EFECTO DE LOS VACÍOS EN EL MINERAL SOBRE LA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PARA NUEVE MEZCLAS DIFERENTES	43
GRÁFICA 8. DATOS DE SALIDA TÍPICOS DE LAS LECTURAS DEL PERFILÓMETRO.....	65
GRÁFICA 9. CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA FRANJA MEDIA PARA MEZCLAS MDC-2, FRENTE A LAS ESPECIFICACIONES INVIAS PARA MEZCLAS MDC-2.....	75
GRÁFICA 10. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETAS CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70	92
GRÁFICA 11. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70.....	92
GRÁFICA 12. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETAS CON ASFALTO CONVENCIONAL 80-100	93

GRÁFICA 13. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO CON ASFALTO CONVENCIONAL 80-100.....	94
GRÁFICA 14. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETAS CON ASFALTO MODIFICADO TIPO II.....	95
GRÁFICA 15. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO CON ASFALTO MODIFICADO TIPO II	95
GRÁFICA 16. DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS PROBETAS CON LOS TRES TIPOS DE ASFALTOS.....	96
GRÁFICA 17. DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LAS PROBETAS CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70 Y ASFALTO MODIFICADO CARIPHALTE TIPO II.	97
GRÁFICA 18. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 0R 60-70.....	101
GRÁFICA 19. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 25R 60-70	102
GRÁFICA 20. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 50R 60-70.....	103
GRÁFICA 21. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 75R 60-70.....	104
GRÁFICA 22. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 100R 60-70.....	105
GRÁFICA 23. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 0R 80-100.....	106
GRÁFICA 24. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 25R 80-100.....	107
GRÁFICA 25. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 50R 80-100.....	108
GRÁFICA 26. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 75R 80-100.....	109

GRÁFICA 27. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 100R 80-100	110
GRÁFICA 28. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 0R MOD. TIPO II	111
GRÁFICA 29. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 25R MOD. TIPO II.....	112
GRÁFICA 30. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 50R MOD. TIPO II.....	113
GRÁFICA 31. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 75R MOD. TIPO II.....	114
GRÁFICA 32. DEFORMACIÓN PERMANENTE PROBETA PROMEDIO 100R MOD. TIPO II.....	115

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. EFECTO DE LOS CAMBIOS EN EL AGREGADO SOBRE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES	38
TABLA 2. EFECTO EN LA RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE POR EL CAMBIO EN LAS PROPIEDADES DEL LIGANTE ASFÁLTICO	40
TABLA 3. FACTORES EN LA MEZCLA QUE AFECTAN LA RESISTENCIA A 44	
TABLA 4. DESCRIPCIÓN DE LAS MUESTRAS	68
TABLA 5. RESULTADOS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO CONVENCIONAL 60-70	68
TABLA 6. RESULTADOS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO CONVENCIONAL 80-100	69
TABLA 7. RESULTADOS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS PARA LA MUESTRA DE ASFALTO MODIFICADO CARIPHALTE PM – TIPO II	69
TABLA 8. RESUMEN DE ENSAYOS A LOS MATERIALES PÉTREOS FUENTE PESCADERO	71
TABLA 9. PESO ESPECÍFICO DE LOS AGREGADOS GRUESOS	72
TABLA 10. PESO ESPECÍFICO DE ARENAS DE TRITURACIÓN	72
TABLA 11. PESO ESPECÍFICO DE ARENAS DE RÍO	72
TABLA 12. PESO ESPECÍFICO DEL LLENANTE MINERAL.....	72
TABLA 13. FRANJA MEDIA GRANULOMÉTRICA PARA UNA MEZCLA TIPO MDC-2	75
TABLA 14. TIPOS DE MEZCLA CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70	76
TABLA 15. TIPOS DE MEZCLA CON ASFALTO CONVENCIONAL 80-100	76
TABLA 16. TIPOS DE MEZCLA CON ASFALTO MODIFICADO CARIPHALTE TIPO II	76
TABLA 17. CANTIDAD DE MATERIAL PÉTREO PARA CADA COMBINACIÓN DE ARENAS EN LAS MEZCLAS	77
TABLA 18. RESUMEN DE RESULTADOS DE PROBETAS DE DISEÑO MARSHALL.....	81
TABLA 19. RESULTADOS DE ESTABILIDAD Y FLUJO DE PROBETAS	82

TABLA 20. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DE PRUEBA CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70	85
TABLA 21. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DE PRUEBA CON ASFALTO CONVENCIONAL 80-100	86
TABLA 22. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DE PRUEBA CON ASFALTO MODIFICADO CARIPHALTE TIPO II	87
TABLA 23. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DEFINITIVAS CON ASFALTO CONVENCIONAL 60-70.....	89
TABLA 24. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DEFINITIVAS CON ASFALTO CONVENCIONAL 80-100.....	89
TABLA 25. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PROBETAS DEFINITIVAS CON ASFALTO MODIFICADO CARIPHALTE TIPO II.....	90

RESUMEN

TÍTULO

EFFECTOS DE LAS ARENAS DE TRITURACION Y DE RIO EN LA DEFORMACION PERMANENTE DE MEZCLAS ASFÁLTICAS DENSAS EN CALIENTE CON ASFALTO CONVENCIONAL Y MODIFICADO ^{1*}

AUTORES

PEÑA ACOSTA, Luis Gabriel**

PALABRAS CLAVES

Mezclas asfálticas densas en caliente, deformación permanente, arenas

DESCRIPCIÓN

Un pavimento se diseña y construye con la finalidad de proveer una superficie plana, suave y de alta calidad que permita la circulación del tránsito vehicular principalmente. Pero la capa asfáltica siempre se ve afectada por alguna falla, una de estas son las deformaciones plásticas que ocurren debido a la repetidas cargas ocasionadas por la acción del tráfico. Estableciendo un punto de partida para la el desarrollo de la investigaciones se recolecto información acerca de la incidencia de los componentes de la carpeta asfáltica en la deformación plásticas del pavimento, encontrando que el material en el laboratorio puede ser sometido a ensayos uniaxiales, triaxiales, cortantes y de simulación. Con estos se han podido determinar los parámetros más influyentes en el comportamiento de los pavimentos ante la aparición de la deformación plástica.

En la actualidad se utilizan técnicas muy avanzadas para conocer la deformación permanente de las mezclas asfálticas, técnicas de simulación como la prueba Wheel track y la especificada en la norma de deformación permanente BS 226, la cual es utilizada en nuestro proyecto de investigación. Una de los componentes que influye directamente en la deformación de la capa asfáltica además del ligante asfaltico son los porcentajes de material granular que la conforman, es por esto que en este proyecto se estudiaran los diferentes comportamientos de la capa asfáltica según los porcentajes que contengan de arena de rio y de arena de trituración.

*Trabajo de Investigación

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Ingeniero Eduardo Alberto Castañeda Pinzón.

ABSTRACT

TITLE

THE EFFECTS OF SAND CRUSHING AND OF THE RIVER IN THE PERMANENT DEFORMATION OF DENSE HOT MIXTURES CONVENTIONAL AND MODIFIED ASPHALT*

AUTHORS

PEÑA ACOSTA, Luis Gabriel^{2**}

KEYWORDS

Hot dense asphalt mixtures, permanent deformation, sands of grinding and river.

DESCRIPTION

Pavement was designed and constructed for the purpose of providing a flat, smooth, high quality to permit the movement of vehicular traffic mainly. But the asphalt is always affected by any failure, one of these are the plastic deformations that occur due to repeated loads caused by the action of traffic. Establishing a starting point for the development of the research has collected information about the incidence of the components of the asphalt in the plastic deformation of the pavement, finding that the material in the laboratory may be subjected to uniaxial tests, triaxial shear and simulation. These have been able to determine the most influential parameters on the behavior of the pavements at the onset of plastic deformation. At present very advanced techniques are used to determine the permanent deformation of asphalt mixtures, simulation techniques such as Wheel track test and the standard specified in BS 226 permanent deformation, which is used in our research Project.

A component that directly affects the deformation of the asphalt layer of asphalt binder also are the percentages of granular material comprising it, which is why this project is to study the different behaviors of the asphalt layer as containing percentages of river sand and sand crushing.

* Research Work.

**Faculty of Mechanical Engineering Physics. School of Civil Engineering
Director: Eduardo Alberto Castañeda Pinzon.

INTRODUCCIÓN

En la economía de nuestro país incide mucho el presupuesto manejado en la infraestructura vial, pues como es sabido la construcción, mantenimiento o rehabilitación de una vía implica costos gigantes. Los nuevos ingenieros dedicados a esta profesión tienen como reto aportar investigaciones y estudios que proporcionen datos importantes para la fabricación y diseño de pavimentos más eficaces y de alta vida de servicio estimada.

En las mezclas asfálticas los porcentajes de las partículas de material granular que la conforman hacen que se incrementen o disminuyan sus propiedades, de ahí la importancia de escoger una mezcla específica a la hora de diseñar, construir o rehabilitar una vía, ya que esta misma actúa como principal componente estructural en un pavimento.

En este proyecto se analizará el comportamiento de las mezclas asfálticas densas en caliente de tipo MDC-2 variando el porcentaje de los agregados finos que la componen, con un porcentaje de arena de río y otro porcentaje de arena de trituración, además se utilizarán tres tipos de asfaltos, dos asfaltos convencionales y un asfalto modificado con polímeros, La metodología de diseño de las mezclas asfálticas empleado en esta investigación es el diseño Marshall, esta es utilizada en la compactación de las mezclas asfálticas densas en caliente MDC-2 de acuerdo a la especificación de construcción de carreteras del INVIAS/07.

El análisis de los resultados de esta investigación está dado en la comparación de la resistencia a la deformación permanente de cada mezcla asfáltica densa en caliente diseñada, según el tipo de asfalto y la combinación de los porcentajes de arena de río y de trituración. Los resultados definen la incidencia de los agregados

granulares finos y el tipo de asfalto en el diseño y construcción de una carpeta asfáltica viable en la infraestructura de una vía.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Variar los porcentajes (%) de arenas de trituración y arenas de río, para evaluar la deformación permanente en mezclas asfálticas densas en caliente de asfaltos convencional y modificado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer 5 combinaciones de arena de trituración y arena de río, variando los porcentajes de cada una, trabajando con la franja central de la MDC-2 para mezclas asfálticas densas en caliente de acuerdo a la especificación de construcción de carreteras del INVIAS/07.
- Medir la deformación permanente en las mezclas densas en caliente con asfalto convencional para cada combinación de arenas de trituración y de río.
- Medir la deformación permanente en las mezclas asfálticas densas en caliente con asfalto modificado para cada combinación de arenas de trituración y de río.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DEFORMACIONES PERMANENTES

Las deformaciones plásticas son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos (figura 1 y figura 2), exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones permanentes producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento, y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas. La formación de roderas de profundidad importante se asocia con deformaciones plásticas acumuladas del 1 al 2%.



Figura 1. Deformaciones plásticas en la vía



Figura 2. Deformación permanente en pavimentos

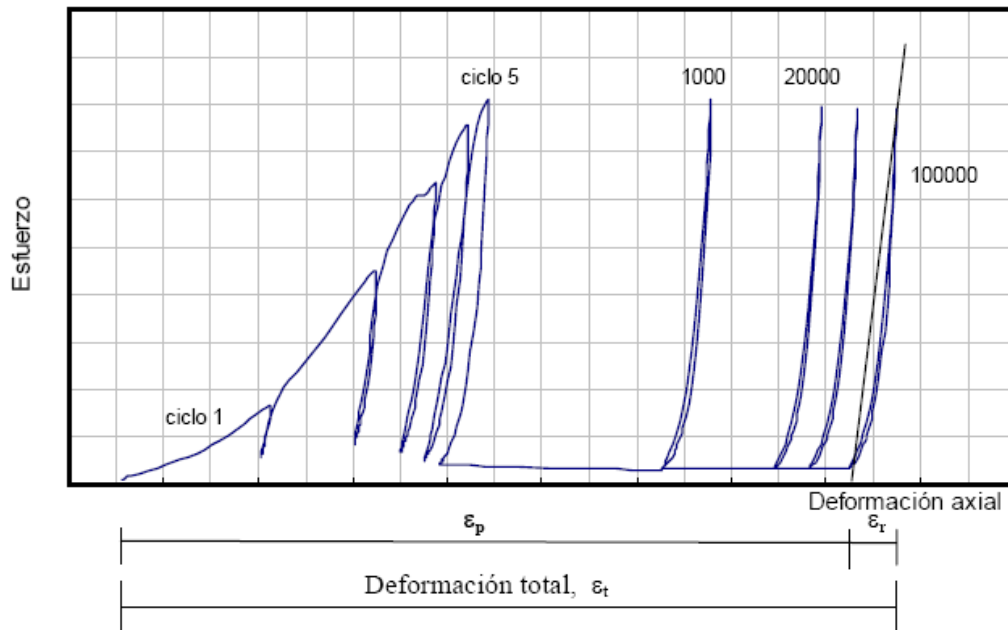
El análisis de la deformación permanente en un sistema de pavimento es un elemento importante de muchos de los esquemas de diseño que requieren consideración detallada de la acumulación progresiva de las deformaciones plásticas en cada capa del pavimento.

2.1.1. Deformación en materiales granulares

Cuando el material granular es sometido a cargas, se generan esfuerzos que hasta cierto punto afectarán a las partículas que lo conforman, reflejándose en desgaste superficial, fractura y falla, que alteran las características físicas y mecánicas del material. Inicialmente, estas alteraciones, sólo ocurrirán por la acomodación de las partículas, pero luego se presentará el fracturamiento de las mismas debido a la acumulación de esfuerzos en los contactos.

Para los materiales granulares, en los primeros ciclos de carga, la deformación permanente es considerable, como lo indica la deformación plástica (ϵ_p) en la Grafica 1. Al incrementar el número de repeticiones, la deformación plástica debida a cada aplicación de carga decrece, después de algunos miles de repeticiones de carga, la deformación es casi totalmente recuperable (ϵ_r), es decir, el material experimenta casi en su totalidad una deformación de tipo elástico o resiliente, condición en la cual el material es considerado en estado resiliente, permitiendo determinar un importante parámetro del material denominado "Módulo

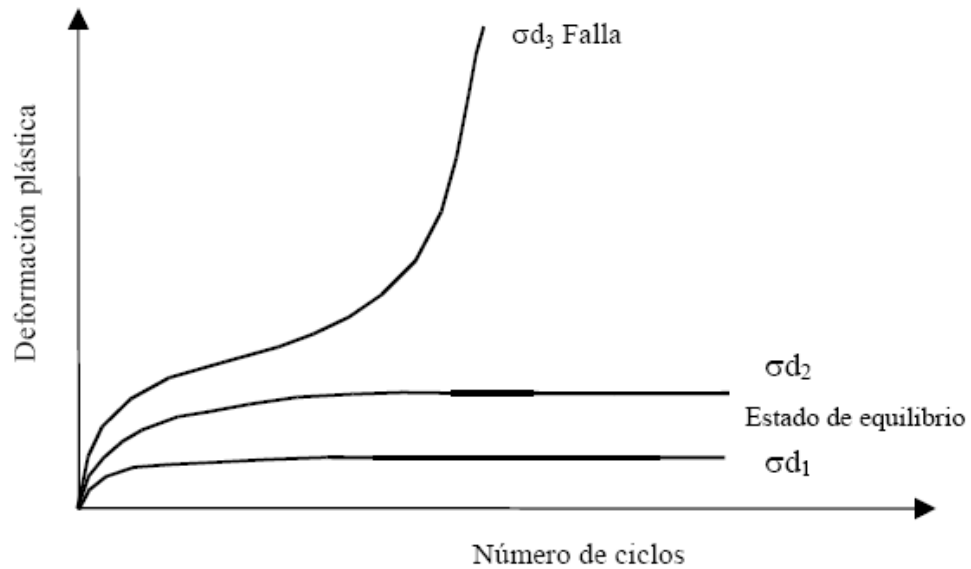
de Resiliencia”. En este punto se ha llegado a una condición de equilibrio, siempre que el esfuerzo desviador sea lo suficientemente pequeño para no llevar la muestra a la falla.



Gráfica 1. Acumulación de deformación con el número de ciclos en materiales granulares

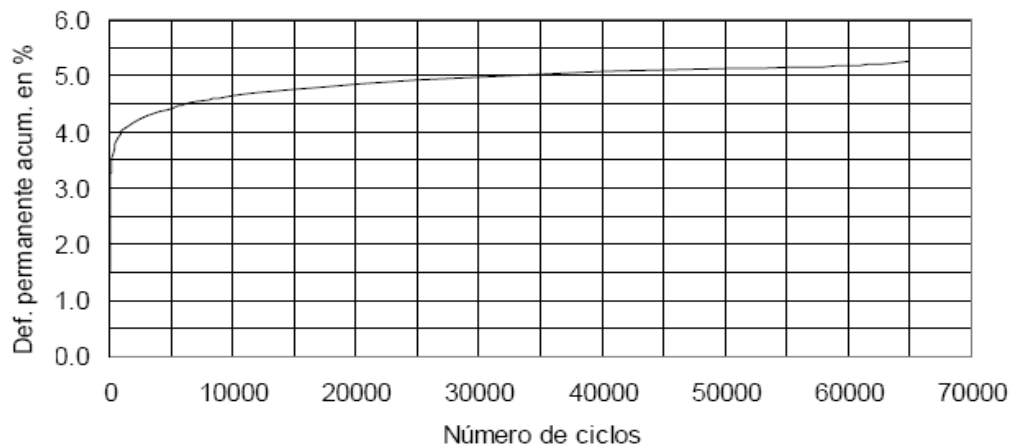
El máximo esfuerzo desviador asociado a esta condición es denominado “Esfuerzo Umbral” y es un concepto importante para el diseño. La grafica 1 ilustra este concepto (Brown, 1994).

En la grafica 2, se aprecia cómo para un esfuerzo desviador muy alto, la velocidad de acumulación de la deformación plástica puede incrementarse conduciendo al espécimen de prueba a la falla. Se ha sugerido que el esfuerzo umbral para materiales granulares puede expresarse como la relación entre el esfuerzo pico y el de falla; diferentes autores proponen aplicar un esfuerzo desviador equivalente al 70% del de falla, como la relación máxima de esfuerzos para minimizar el desarrollo de deformación plástica.



Gráfica 2. Acumulación de deformación plástica bajo carga repetida

La grafica 3 muestra el proceso de acumulación de la deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica, al aumentar el número de ciclos, para un esfuerzo de magnitud constante.



Gráfica 3. Acumulación de deformación permanente de un material granular sujeto a carga cíclica

En la grafica anterior se aprecia que la acumulación de la deformación permanente presenta tres fases: la primera es casi instantánea, se presenta en las primeras decenas de ciclos de carga, y en ella se produce aproximadamente el 70% de la deformación total. Posteriormente se presenta una fase transitoria en la que la deformación se acumula gradualmente durante los primeros miles de ciclos de aplicación de la carga, finalmente, se alcanza una fase estable en la que la velocidad de acumulación de la deformación es muy pequeña y la deformación permanente tiende a su máximo valor. A partir de este momento, la aplicación de un número mayor de ciclos de carga ya no tiene prácticamente ningún efecto adicional.

2.1.2. Deformación en capas tratadas con asfalto

Las mezclas asfálticas están compuestas por partículas de agregados de naturaleza elástica, aproximadamente un 90% de agregado pétreo grueso y fino, que son los que deben soportar las cargas del tráfico, un 5% de ligante asfáltico (naturaleza viscoelástica), que actúa como pegamento, manteniendo unido el esqueleto mineral, y un 5% de polvo mineral (filler).

La función de estas mezclas es proporcionar una superficie de rodamiento cómoda, segura y económica a los usuarios de las vías de comunicación, facilitando la circulación de los vehículos, además debe transmitir, suficientemente, las cargas debidas al tráfico a la subrasante para que sean soportadas por ésta.

Cuando se le aplica una carga a una mezcla asfáltica, las partículas de los agregados se cierran, unidas de tal manera que fungen como una sola, larga y elástica piedra, y como el asfalto actuará como una banda de goma, volverá a su forma original cuando desaparezca la carga, de esta forma no se acumularán deformaciones permanentes.

2.2. PROGRESION DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

La deformación permanente en los materiales de los pavimentos, se desarrolla gradualmente con el incremento del número de aplicaciones de carga, usualmente aparecen como depresiones longitudinales en la trayectoria de la rueda, acompañadas por una pequeña elevación a los lados de la huella, como se aprecia en las figuras 3 y 4. Esto es causado por una combinación de la densificación (disminución en el volumen y, por consiguiente, incremento en la densidad) y deformación cortante, y puede ocurrir en una o mas capas del pavimento como también en la subrasante. La densificación de material es un fenómeno secundario dentro de la formación de roderas, potencialmente contribuye en menos de 5 mm., en la profundidad de la rodera. Mientras que la deformación cortante es uno de los mecanismos primarios de la aparición del rutting. De allí, la importancia de colocar materiales de alta densidad con el propósito de minimizar las deformaciones por cortante.

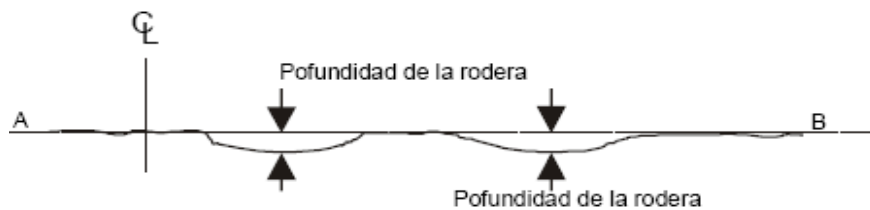
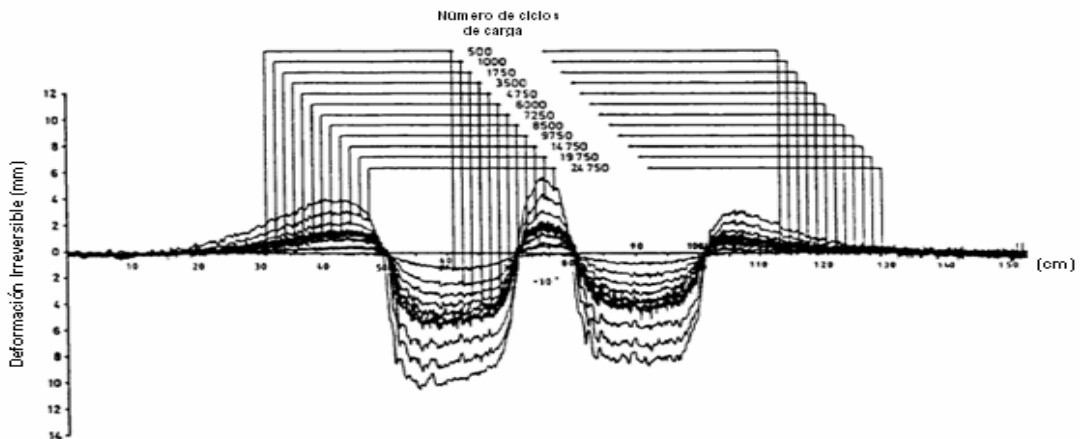


Figura 3. Deformación permanente (Rodera)



Figura 4. Rodera en un pavimento en servicio

La grafica 4, extraída del trabajo realizado por Eisenmann y Hilmer (1987), muestra el efecto en el perfil de la superficie del pavimento para un número de pasadas de la rueda en un ensayo de pista. Estos datos permiten la medición del promedio de profundidad de rodera como también el cálculo de los volúmenes de material desplazado bajo la llanta y en las zonas de elevación adyacentes.



Gráfica 4. Efecto del número de rodadas en el perfil transversal de la superficie del pavimento

De la grafica 4 se puede decir que:

- En el estado inicial de tráfico, el incremento de la deformación permanente bajo la rueda es más grande que el incremento en las zonas de elevación. Por consiguiente, en esta fase inicial, la compactación por el tráfico tiene una importante influencia en el rutting.
- Luego del estado inicial, el decremento en el volumen debajo de la rueda es aproximadamente igual al incremento de volumen en las zonas de elevación adyacentes. Esta es una indicación de que la compactación bajo tráfico ha sido completada para la mayor parte, y que el nuevo rutting será causado esencialmente por el desplazamiento con un volumen que se mantiene constante. Esta fase se considera como representativa del comportamiento de la deformación para gran parte del tiempo de vida del pavimento.

La deformación permanente a través de la capa asfáltica es mayor cerca de la superficie de carga y disminuye gradualmente en los niveles más bajos, debido a que el rutting es causado por un flujo plástico. Tal distribución de las roderas con profundidad es razonable: se encuentra mayor resistencia al flujo plástico a grandes profundidades y los esfuerzos cortantes allí son más pequeños. Debido a esto, usualmente se creía que una medida para mejorar la resistencia a las deformaciones permanentes era aumentar el grosor de la capa asfáltica, pero se reportó que la deformación dentro de una capa asfáltica (reducción de espesor bajo la acción de los neumáticos) no sigue aumentando con el incremento del grosor de la capa después de determinado umbral. Medidas realizadas por la AASHO Road Test indicaron que la profundidad de rodera alcanza un valor límite para grosores de aproximadamente 10 pulgadas.

El promedio de vida de los pavimentos asfálticos ante las deformaciones plásticas, que se ha obtenido a través de la experiencia en agencias de investigación de carreteras de los E.U.A., es de 11 años, donde se reporta que menos del 1% de los pavimentos falla durante el 1er. año de servicio, el 14% de los pavimentos, fallan antes de los 5 años y el 42% de los pavimentos falla entre los 6 y 10 años.

2.3. CLASIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

2.3.1. Según el comportamiento estructural

La deformación del pavimento puede originarse por deformación elástica, por consolidación del terreno de cimentación y la infraestructura, por una combinación de deformación elástica y plástica, o una deformación mecánica. A continuación se definen cada una de ellas:

2.3.1.1. *Deformación elástica*

Ocurre cuando una carga deforma temporalmente los materiales de la cimentación y comprime el aire que llena los vacíos en la base, subbase y subrasante. Si la deformación es verdaderamente elástica, la superficie regresa a su posición original después de que la carga pasa; de modo que no se produce una falta de uniformidad permanente, aún bajo aplicaciones de carga.

2.3.1.2. *Deformación por consolidación*

Depresiones cerca del centro de la carga aplicada sin el acompañamiento de las elevaciones laterales, que ocurren cuando la carga produce una presión suficientemente elevada en los poros del suelo para expulsar parte del aire y del agua y así se consolida el material. Aunque la consolidación que resulta de una aplicación de una carga móvil es pequeña, la deformación es permanente, progresa con las repeticiones adicionales de carga hasta que las capas afectadas se consolidan.

2.3.1.3. *Deformación plástica*

Ocurre cuando la presión del agua y del aire dentro de los poros del material de cimentación u otros, se combina con fuerzas producidas por la carga para desplazar el material del camino. La deformación resultante es progresiva bajo la repetición de las cargas y constituye una de las causas principales del deterioro y deformación permanente de las superficies del camino, manifestándose mediante una depresión cerca del centro de la carga aplicada, con elevaciones a cada lado de la depresión.

2.3.1.4. *Deformación mecánica*

Es el resultado de un asentamiento de las capas inferiores que puede acompañarse de grietas en las capas de pavimento. Esta ocurre cuando la estructura del pavimento no está bien proyectada o construida.

2.3.2. Según la localización de la falla

2.3.2.1. Roderas por fallas en la subrasante

Son causadas por un excesivo esfuerzo repetido en las capas interiores (base o subbase) bajo la capa de asfalto. Aunque los materiales duros pueden reducir este tipo de roderas, es considerado un problema estructural, más que de los materiales entre sí. Esencialmente, no hay suficiente fuerza, o dureza, en el pavimento para reducir la fuerza aplicada en un nivel tolerable, también puede ser causado por un inesperado debilitamiento de una de las capas generadas por la intrusión de humedad. La deformación ocurre en las capas inferiores.

Las cargas de tráfico provocan hundimientos y debilitamiento, por debajo, en la estructura del pavimento. Si la capa de pavimento es suficientemente flexible, se deformará por tener espesores delgados.



Figura 5. Roderas por fallas en la subrasante

Los hundimientos por roderas tienden a ser de anchos que van desde los 750 mm Hasta los 1000 mm, con poca profundidad y formas curvadas cruzando la sección del pavimento sin fisurarse. Si se hiciera una zanja o corte, la deformación de pavimento indicaría, que el espesor del pavimento permanece constante y cualquiera de las capas granulares (base o subbase) tiene deformaciones.

Algunas roderas tienden a presentar pendientes pronunciadas con bordes quebrados en ambos lados de la trayectoria de la rueda.

2.3.2.2. Roderas por fallas en la capa del pavimento

Es el tipo de roderas que más preocupa a los diseñadores de mezclas asfálticas, se produce debido a la escasez de la capacidad portante o a la insuficiencia de soportar cargas pesadas.

Una mezcla asfáltica débil, va acumulando una pequeña pero permanente deformación plástica, en cada pulso de carga pesada, y eventualmente forma una ruta caracterizada con una inclinación y deslizamiento lateral de la mezcla, las roderas pueden ocurrir en la capa superficial del pavimento o debido al debilitamiento en las capas inferiores del mismo.



Figura 6. Roderas por fallas en las capas asfálticas

2.3.3. Según la profundidad de la huella

La Federal Highway Administration (FHWA) clasificó a las deformaciones permanentes en cuatro niveles de gravedad:

- Hidroplaneo: 0.2 a 0.25 pulgadas
- Bajo: 0.25 a 0.5 pulgadas
- Medio: 0.5 a 1.0 pulgadas
- Alto: mayor a 1.0 pulgada

Sin embargo, para pavimentos en caminos con pendientes del orden del 2%, una profundidad de huella acumulada cercana a las 0.5 pulgadas es suficiente para causar hidroplaneo en automóviles que viajen a velocidades de 50 millas por hora o más.

2.4. FACTORES QUE AFECTAN LAS DEFORMACIONES PERMANENTES

Existen una serie de factores que afectan o intervienen en la formación de las roderas o deformaciones permanentes de los pavimentos. Cabe mencionar que se deben tener muy en cuenta estos factores al momento de realizar el diseño y la construcción de un pavimento.

2.4.1. Agregados minerales

El agregado mineral juega un papel muy importante en el desempeño de las mezclas asfálticas, se ha encontrado que las características que más influyen en dicho desempeño y en particular a deformaciones permanentes, son las siguientes:

- Graduación (con énfasis en la zona restringida)
- Tamaño máximo
- Angularidad del agregado grueso (Caras fracturadas)
- Angularidad del agregado fino (Vacíos sin compactar)
- Porcentaje de finos

- Mineralogía (Fuente de origen de los agregados)

2.4.1.1. Gradación

Muchas investigaciones indican que las gradaciones densas de agregados son las más deseables para mitigar los efectos de las deformaciones permanentes.

Cuando se compacta apropiadamente, las mezclas con gradación densa o continua de agregados tienen menos vacíos y más puntos de contacto entre las partículas que las mezclas de granulometría abierta. Brown y Pell (1974), llegaron a la conclusión que las mezclas poco gradadas exhiben más deformación que una mezcla bien gradada. Ellos argumentaron que esto se debe a una menor interacción en las mezclas de gradación pobre. También adicionaron que, a causa de la interacción entre los agregados se vuelve más importante que las mezclas de gradación pobre pueden ser más susceptibles a las deformaciones permanentes a altas temperaturas, un descubrimiento aparentemente confirmado por los resultados de ensayos de pista.

Por su parte, Elliot (1991) revisó en su estudio el efecto de la variación de la granulometría en la generación de roderas de un pavimento asfáltico. Los resultados mostraron que las granulometrías finas y granulares experimentaron profundidades de roderas de 7% a 10% mayores a las obtenidas para la mezcla de trabajo, mientras que las variaciones de granulometrías fina-granular y granular-fina, experimentaron profundidades de roderas de 13% a 19% mayores.

2.4.1.2. Textura de la superficie

Para una buena resistencia al rutting, la textura de la superficie de los agregados juega un papel muy importante. Particularmente en las capas asfálticas más densas y climas calientes, se requiere que los agregados tengan una textura rugosa en su superficie.

2.4.1.3. Forma

La forma de las partículas también es importante, Uge y Van de Loo encontraron que las mezclas hechas de agregados angulares (obtenidos por triturado) se deformaban en menor grado y eran más estables que las mezclas que tenían la misma composición y gradación, pero hechas de agregados redondeados (grava de río).

La figura 7 muestra que para un contenido de vacíos dado, los agregados triturados producen mezclas más duras. En este estudio, los efectos del triturado en la textura de la superficie no fueron definidos, por consiguiente es difícil separar los efectos de la textura de la superficie de los de forma.

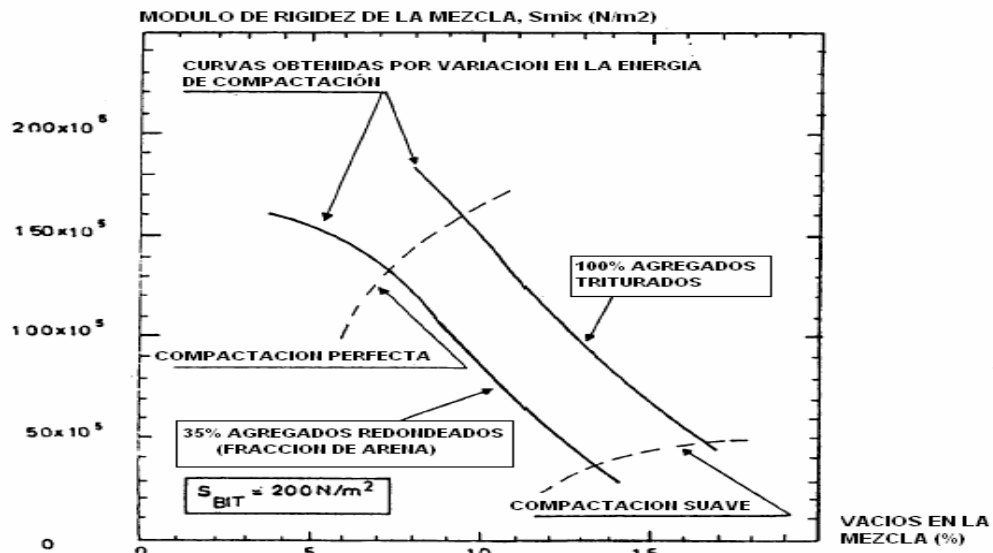


Figura 7. Efecto de la angularidad del agregado y el contenido de vacíos en la rigidez a compresión de una mezcla

En la figura 8 se puede observar algo mucho más interesante, una composición intermedia de agregado, en la cual sólo una fracción de arena fue triturada, se comportó mejor que la situación en la que sólo el agregado grueso fue triturado, aunque la primera mezcla tuviera una proporción más grande de componentes redondeados (70% contra 25%). Esto indicó que el contacto entre las partículas puede ser un factor más significante que el aumento del triturado.

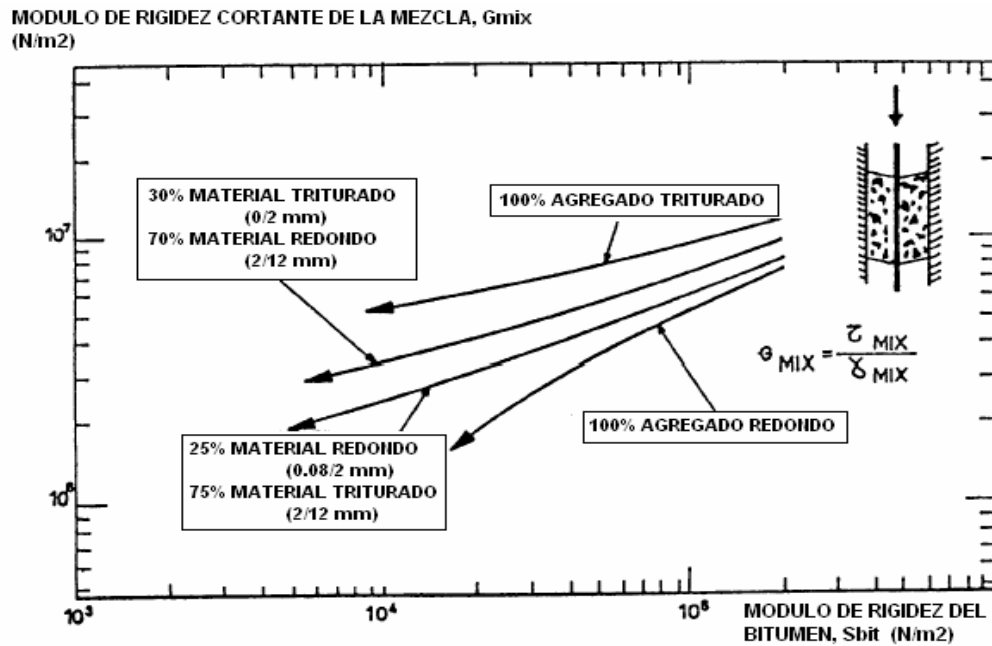


Figura 8. Efecto de la angularidad del agregado y rigidez del bitumen

2.4.1.4. Tamaño

Con el aumento en las presiones de rueda, ejes de carga y repeticiones de carga, resurgió el interés por el uso de mezclas con agregados grandes. Davis (1988) reportó que algunos pavimentos construidos con asfaltos suaves, altos volúmenes de concentración de agregados, bajo contenido de vacíos y un tamaño máximo del agregado grande (1 ½ pulgadas o más), mostraron una buena resistencia a las deformaciones permanentes. Basado en dicha observación, pudo concluir que el uso de tamaños máximos de agregados grandes, cerca de dos tercios del grosor de la capa, puede ser benéfico en la reducción de la tendencia a las deformaciones permanentes de mezclas sujetas a altas presiones de rueda. En resumen, la tabla 1 muestra cómo los cambios en el agregado afectan las deformaciones permanentes en los pavimentos.

Tabla 1. Efecto de los cambios en el agregado sobre las deformaciones permanentes

Agregado	Factor	Cambio en el factor	Efecto del cambio en la resistencia al rutting
	Textura de la superficie	Suave a áspero	Aumenta
	Gradación	Abierta a continua	Aumenta
	Forma	Redondeada a angular	Aumenta
	Tamaño	Aumento en el tamaño máximo	Aumenta

2.4.1.5. Influencia de la mineralogía

No se revelan grandes relaciones entre la mineralogía y petrografía y el desempeño general de las mezclas. Esto podría deberse a que todas las partículas de agregados son cubiertas con una película de asfalto; sin embargo, el pulimento y la fricción es altamente ligada a estas características. Estudios han revelado la relación entre la mineralogía del agregado y propiedades de pulimento/fricción y sugerido que la información petrográfica sea utilizada en ensayos físicos para establecer criterios de pulimento y fricción del agregado.

La influencia, más bien se enfoca hacia la fuente de origen, propiedades tales como tenacidad (Resistencia a la abrasión), durabilidad (Intemperismo *Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica acelerado*) y materiales deletéreos, las cuales están ligadas al tipo de falla de fisuras, baches y desprendimientos.

Con base a esto, podemos mencionar que la mayoría de los agregados son resistentes a la degradación durante la producción (p.e. almacenamiento, manejo y mezcla) y construcción (p.e. transporte, colocación y compactación).

La resistencia a la abrasión del agregado minimiza los problemas de control en la construcción y asegura que la mezcla tenga las propiedades más cercanas al diseño. La mayoría de las HMA también son resistentes a la degradación cuando son sometidas al tráfico. Debido a que la degradación de las HMA es inicialmente

controlada por las propiedades del agregado, la mayoría de los agregados son resistentes al desgaste y trituración por la acción del tráfico pesado.

Las HMA deberían ser también resistentes al intemperismo durante la vida de servicio. Aunque cubiertos por una película de asfalto, los agregados son expuestos a la acción del intemperismo (p.e. lluvia y sequía, y congelamiento y deshielo) cuando son tratados y triturados durante la compactación o cuando la película de asfalto es desplazada por el tráfico. El desprendimiento parcial en las capas de las HMA y/o degradación del agregado puede también exponer al agregado a estos elementos.

2.4.2. Mezcla asfáltica

El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, las propiedades volumétricas y la calidad de los agregados pétreos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla

2.4.2.1. Ligante asfáltico (Binder)

2.4.2.1.1. Tipo de ligante asfáltico

Un tipo de asfalto puede influir decisivamente sobre el comportamiento ante las deformaciones plásticas de una mezcla asfáltica en caliente. Basados en el ensayo uniaxial estático, Mahboub y Little (1988) encontraron que el uso de asfaltos menos viscosos hacían a la mezcla menos rígida y por consiguiente, más susceptible a las deformaciones permanentes. Los autores Monismith, Epps y Finn, en 1985, hicieron una observación similar y recomendaron el uso de asfaltos más duros, es decir, más viscosos para la construcción de pavimentos gruesos en climas calientes.

2.4.2.1.2. *Contenido de ligante asfáltico*

El contenido de ligante asfáltico o cemento asfáltico afecta la capacidad de la mezcla asfáltica de resistir las deformaciones plásticas. El Método Marshall y Hveem son los dos métodos generalmente utilizados para seleccionar de manera preliminar el porcentaje de cemento asfáltico.

Monosmith (1988), recomendó que la mezcla asfáltica deba tener un contenido asfáltico semejante al contenido de vacíos de aproximadamente 4%. Mahboub y Little (1988) indicaron que grandes contenidos de asfalto producen bajos contenidos de vacíos en las mezclas y como consecuencia un incremento potencial en la susceptibilidad a la deformación plástica de la mezcla. Ellos propusieron que la reducción en contenido de vacíos en la mezcla es resultado del incremento en el contenido de asfalto, indicaron que el espacio destinado a los vacíos es rellenado con el ligante asfáltico.

Introducir a la mezcla un contenido de asfalto mayor al debido, es equivalente a introducir lubricante entre las partículas de agregado y por otro lado se ajusta en gran medida la red de contenido de vacíos. Este fenómeno causa que la mezcla con alto contenido de asfalto sea también muy susceptible a las roderas.

Tabla 2. Efecto en la resistencia a la deformación permanente por el cambio en las propiedades del ligante asfáltico

Ligante Asfáltico	Factor	Cambio en el factor	Efecto del cambio en la resistencia al rutting
	Rigidez	Aumento	Aumenta
	Contenido	Aumenta	Disminuye

2.4.2.2. *Polvo Mineral (Filler)*

El polvo mineral junto con el ligante forman una masa asfáltica o mastico cuya calidad tiene una importancia fundamental en el comportamiento reológico, impermeabilidad, y durabilidad de la mezcla asfáltica.

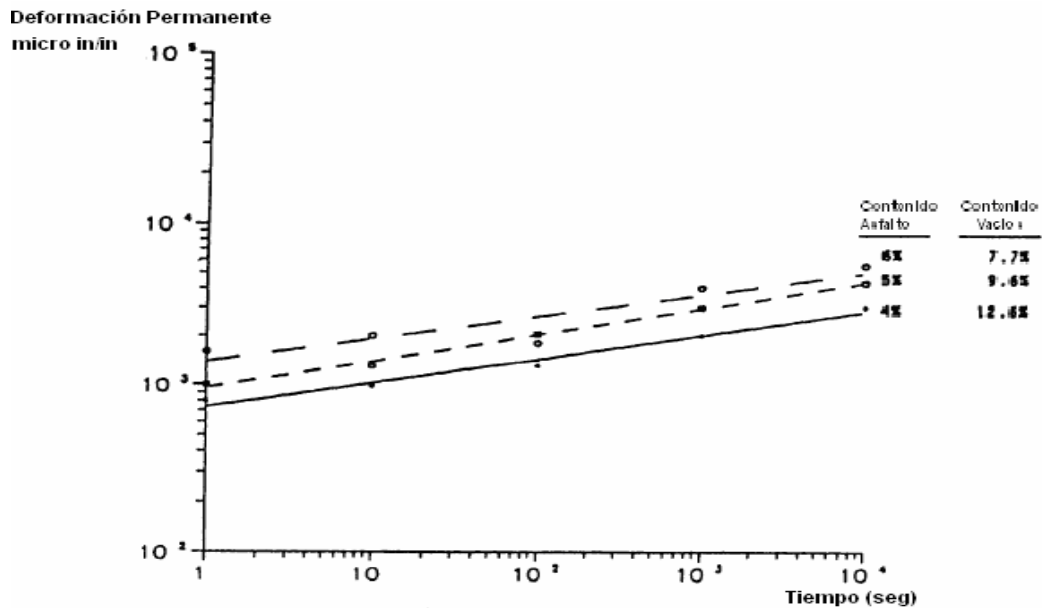
Cuando el polvo mineral tiene afinidad por el agua puede producirse una degradación, en el tiempo, de la estructura íntima de la mezcla que se pondría de manifiesto por una menor estabilidad, con riesgo de deformaciones inesperadas; y por una clara caída de la resistencia.

2.4.2.3. Cantidad de vacíos (aire)

Mahboub y Little (1988) indicaron que altos contenidos de asfalto producían un bajo contenido de vacíos que llevaban a incrementar el potencial de **rutting**, como se puede apreciar en la grafica 5. Ellos sugirieron que la reducción en los vacíos de aire como resultado del incremento en la cantidad de asfalto indicaba que los espacios vacíos eran llenados con asfalto, como resultado, el incremento en la cantidad de asfalto utilizado seria equivalente a la introducción de lubricantes entre las partículas de agregado, y por otro lado, las partículas quedarían separadas por una muy apretada red de vacíos de aire. Este fenómeno hace que las mezclas con alto contenido de asfalto sean más susceptibles a las deformaciones permanentes.

En el campo, el porcentaje de vacíos aceptable en una mezcla (4.5%), es generalmente alcanzado con energía de compactación.

Monismith (1994), observó que un incremento en el contenido de vacíos en la mezcla, provoca una disminución en la resistencia de la mezcla a la deformación plástica.



Gráfica 5. Tendencia a la deformación permanente según el contenido de asfalto y vacíos de aire

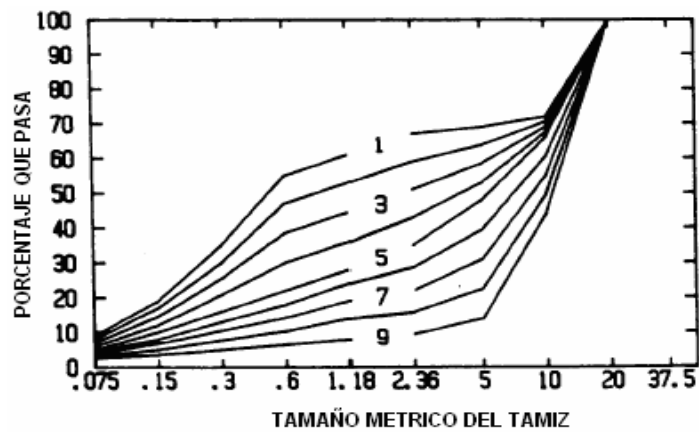
2.4.2.4. VMA: Vacíos en el agregado mineral

Alrededor del año 1985, varios investigadores llegaron a la conclusión que para lograr una buena resistencia a las deformaciones permanentes se requería bajo contenido de vacíos en el agregado mineral (VMA), y una gradación deseable con un mínimo de VMA se puede determinar utilizando ensayos de agregado seco.

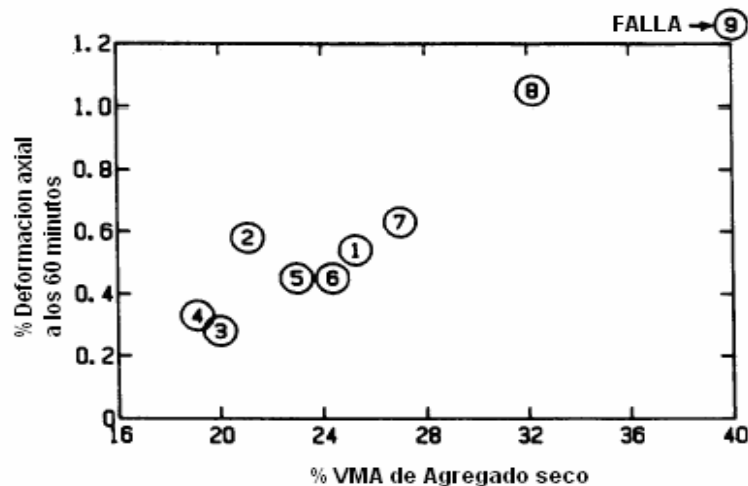
Sin embargo, se advirtió que estos valores teóricos tan bajos de VMA podrían no ser deseables en la práctica, ya que no proporcionarían los suficientes vacíos en el agregado para tener la cantidad de ligante asfáltico que asegurará la compactación satisfactoria sin que la mezcla se vuelva sobrellenada.

En la grafica 6 se identifican las curvas de gradación de agregados para nueve mezclas que fueron utilizadas para estudiar la influencia de los vacíos en las deformaciones permanentes, esto último se refleja en la grafica 7.

Kandhal y Mallick (2001) observaron en su estudio el efecto de los vacíos en el agregado mineral (VAM) sobre el potencial de generación de roderas en las mezclas asfálticas, utilizando el analizador de pavimentos asfálticos APA sobre mezclas que contenían distintos tipos de agregados (calizas, granitos, entre otras), y concluyeron que el efecto de este factor está asociado con el espesor de la capa asfáltica. Un incremento en los vacíos y en el espesor de la capa de mezcla asfáltica, causan un incremento en las deformaciones permanentes para mezclas de granito y caliza, mientras que causa un decremento en las deformaciones de mezclas que contienen agregados de gran tamaño.



Gráfica 6. Curvas de gradación



Gráfica 7. Efecto de los vacíos en el mineral sobre la resistencia a la deformación para nueve mezclas diferentes

2.4.2.5. Compactación

Como ya se ha mencionado, la reducción en los vacíos de aire, por encima de determinado punto, incrementa la resistencia de la mezcla al **rutting**. En el campo, un bajo contenido de vacíos generalmente se logra con una alta energía de compactación. Uge y Van de Loo encontraron que los desplazamientos relativos de las partículas minerales son de la misma naturaleza en una mezcla asfáltica manejada a alta temperatura que una a moderada temperatura, durante su colocación o compactación, pero si son sometidas a la acción de una carga prolongada. Por consiguiente, para minimizar la tendencia al rutting, recomendaron el uso de mezclas duras y rodillos pesados para la compactación; dicha combinación resultaría en un arreglo improvisado del esqueleto mineral y, de este modo, un incremento en la fricción interna. Estas mezclas duras, totalmente compactadas después de su colocación serán más resistentes a la deformación permanente.

En 1987, Linden y Van der Heide resaltaron la importancia de una compactación apropiada y llegaron a la conclusión que el grado de compactación es uno de los principales parámetros de calidad en la colocación de la mezcla, especialmente para los diseños críticos, aquellos que tienen un bajo contenido de bitumen para intentar entregar una alta resistencia a la deformación permanente.

Tabla 3. Factores en la mezcla que afectan la resistencia a las deformaciones permanentes

Mezcla	Factor	Variación del factor	Efecto de la variación en la resistencia al rutting
	Contenido de Ligante Asfáltico	Aumento	Disminuye
	Contenido de vacíos de aire	Aumento	Disminuye
	VMA	Aumento	Disminuye

2.4.3. Modificadores Asfálticos

Diversos investigadores han tratado de mejorar el desempeño del pavimento ante las deformaciones permanentes, con el uso de modificadores asfálticos (polímeros, microfibras, etc.) y así intentar aumentar la viscosidad del ligante asfáltico a altas temperaturas sin tener el efecto adverso en temperaturas bajas.

El uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros, así como la adición de fibras en la mezcla asfáltica, contribuye en una mejor redistribución de los esfuerzos armando la mezcla.

Diversos análisis han demostrado que la modificación del asfalto con diferentes aditivos tiene el potencial de mejorar la resistencia a la deformación permanente de las mezclas asfálticas de agregado. Sin embargo, los resultados han mostrado que para determinados asfaltos no todos los modificadores serán igual de efectivos en mejorar la resistencia al **rutting**, y que la influencia de un modificador específico es dependiente del asfalto. Por ello es importante evaluar la combinación particular asfalto/modificador con el agregado específico para determinar si el modificador asfáltico mejorará la resistencia a la deformación permanente de una mezcla. Los asfaltos modificados tienen una baja susceptibilidad térmica a la de los convencionales, lo que favorece su buen comportamiento ante las deformaciones plásticas.

2.4.3.1. Empleo de polímeros

El empleo de modificadores asfálticos, en especial de los polímeros EVA (Etilenoacetato de vinilo), favorece de manera muy considerable el comportamiento de las mezclas, aumentan la resistencia a las altas temperaturas, lo que conduce a que las mezclas se comporten elásticamente, recuperando todas las deformaciones inducidas por las cargas del tráfico, evitando la formación de roderas. Hanson (1991) realizó una evaluación y caracterización de pavimentos flexibles, elaborados con mezclas modificadas con caucho. En las pruebas de

deformación plástica permanente realizadas sobre muestras extraídas en campo, se observó que las mezclas convencionales se deforman más rápido que las mezclas modificadas con el uso de caucho.

Mientras que Kroutz y M. Stroup - Gardiner (1992) realizaron estudios con el fin de observar el comportamiento de mezclas asfálticas modificadas con caucho reciclado, llegando a que la adición del caucho reciclado genera mezclas con menos deformación permanente a altas temperaturas, comparadas con mezclas que no recibieron algún tipo de tratamiento.

Rebala y Estakhri (1995) observaron que mediante la incorporación de caucho al asfalto a temperaturas altas (vía húmeda) se producen mezclas asfálticas que inhiben el agrietamiento y pueden inhibir las roderas. Cuando se agrega el caucho como parte de la granulometría (vía seca) también se producen mezclas resistentes a la formación de roderas pero pueden tener efectos adversos en el agrietamiento. En el proceso de vía seca, el caucho existe como partículas separadas, dichas partículas en el asfalto normalmente intensificarán la propensión al agrietamiento pero podrán aumentar la resistencia a las roderas.

2.4.3.2. *Diferencias entre el asfalto modificado con polímero y el asfalto convencional.*

A continuación se enlistan algunas de las diferencias entre los asfaltos modificados y los asfaltos convencionales

- Los asfaltos convencionales poseen propiedades satisfactorias tanto mecánicas como de adhesión y bajo distintas condiciones climáticas y de tránsito, pero actualmente debido a al gran demanda de tráfico y de las condiciones climáticas, los asfaltos convencionales no satisfacen algunas expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio.

- Los asfaltos convencionales, aún con los grados más duros no es posible eliminar el problema de las deformaciones producidas por el tránsito, especialmente cuando se afrontan condiciones de temperatura alta.
 - Los asfaltos modificados son diseñados eligiendo el polímero correcto para determinada aplicación, y asegurándose que es compatible con el asfalto base, esto se consigue mediante pruebas experimentales de laboratorio y de campo.
- A manera de conclusión se pueden enumerar una serie de ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros.

2.4.3.3. *Ventajas y desventajas de los asfaltos modificados con polímeros*

2.4.3.3.1. *Ventajas*

- Disminuye la susceptibilidad térmica
- Se obtienen mezclas más rígidas a altas temperaturas de servicio reduciendo el ahuellamiento.
- Disminuye la exudación del asfalto: por la mayor viscosidad de la mezcla, su menor tendencia a fluir y su mayor elasticidad.
- Mayor elasticidad: debido a los polímeros de cadenas largas.
- Mayor adherencia: debido a los polímeros de cadenas cortas.
- Mejora la trabajabilidad y la compactación: por la acción lubricante del polímero o de los aditivos incorporados para el mezclado.
- Mayor resistencia al envejecimiento: mantiene las propiedades del ligante, pues los sitios más activos del asfalto son ocupados por el polímero.
- Mejora la vida útil de las mezclas: menos trabajos de conservación.
- Permiten mayor espesor de la película de asfalto sobre el agregado.
- Reduce el costo de mantenimiento.
- Permite la reducción de hasta el 20% de los espesores por su mayor módulo.

- Mayor resistencia a la flexión en la cara inferior de las capas de mezclas asfálticas.

2.4.3.3.2. Desventajas

- Alto costo del polímero.
- Los agregados no deben estar húmedos ni sucios.
- La temperatura mínima de distribución es de 145°C por su rápido endurecimiento

Evidente que la mayor desventaja de estos es el alto costo inicial del asfalto modificado, sin embargo, si hacemos un análisis del costo a largo plazo (es decir, la vida útil de la vía); podemos concluir que el elevado costo inicial queda sobradamente compensado por la reducción del mantenimiento futuro y el alargamiento de la vida de servicio del pavimento.

3. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA EVALUAR LA DEFORMACION PERMANENTE EN MEZCLAS ASFALTICAS.

3.1. RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE LA PISTA DE ENSAYO DE LABORATORIO I.N.V. E – 756 – 07

El ensayo consiste en someter una probeta de la mezcla asfáltica al paso alternativo de una rueda en condiciones determinadas de presión y temperatura, midiéndose periódicamente la profundidad de la deformación producida. Este procedimiento es aplicable principalmente en las mezclas asfálticas producidas en caliente y destinadas a trabajar en condiciones severas de tránsito y clima, aunque variando las condiciones del ensayo puede ser también de utilidad en mezclas de otro tipo.

3.1.1. Equipo de ensayo

El mecanismo de pista Dry Wheel Tracker, fue diseñado por la Wessex Engineering Ltd. del Reino Unido. Wessex ha sido el principal constructor de máquinas de ensayos de pista en Inglaterra por los últimos 25 años. La más reciente máquina computarizada provee un ensayo totalmente automatizado con cálculos automáticos de las ratas de rutting.

Este dispositivo determina deformaciones plásticas en mezclas asfálticas bajo temperaturas y presiones similares a las presentes en las vías en uso, el ensayo puede realizarse durante la construcción del camino o para el diseño de los materiales.



Figura 9. Máquina de ensayo



Figura 10. Cámara de temperatura controlada

3.1.2. Modo de prueba

En esta máquina, una rueda cargada se corre sobre una muestra de pavimento en una cabina aislada y sellada, por 45 minutos. El dispositivo aplica una fuerza vertical de 710 N en la superficie de contacto, a través de una rueda de acero de 150 mm de ancho cubierta con un caucho de 12.5 mm. de grueso. Además, tiene

la posibilidad de un ensamblaje de doble rueda para acomodarse a ensayos de dos especímenes simultáneos.

Los especímenes pueden ser muestras extraídas del campo o fabricados en laboratorio (placas), con un grosor mayor a los 80 mm., y de 200 mm. de diámetro, si son especímenes cilíndricos, o 305 mm. de lado para las placas rectangulares.

La interfase del computador permite al usuario graficar la profundidad de huella versus tiempo mediante la instrumentación de los desplazamientos sobre cada rueda cargada.

La rata de carga es de 26 ciclos por minuto, que corresponde a 52 pasadas del neumático por minuto. Como generalmente la altura del espécimen varía ± 5 mm., se usa yeso para llenar los pequeños vacíos debajo de cada muestra y proveer una base uniforme, luego que han sido instalados los especímenes.

3.1.3. Condiciones de ensayo

3.1.3.1. Temperatura de ensayo

La temperatura normalizada para el ensayo será de $60^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ para todo tipo de mezclas y de zonas climáticas. No obstante, se pueden utilizar otras temperaturas en estudios o ensayos especiales que así lo requieran.

3.1.3.2. Presión de contacto de la rueda

La presión de contacto normalizada, ejercida por la rueda cargada sobre la superficie de la probeta durante todo el ensayo, será de $900 \pm 25 \text{ kN/m}^2$ ($9 \pm 0.25 \text{ kgf/cm}^2$), para todo tipo de mezclas y de zonas climáticas. Sin embargo, en casos especiales o cuando así se requiera, se pueden emplear otras presiones de contacto.

3.1.3.3. *Ejecución del ensayo*

Después del período de enfriamiento de la mezcla, las probetas se introducen en un horno a $60^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C durante cuatro horas como mínimo, antes de la ejecución del ensayo. Dos horas antes del comienzo del mismo, se conecta el sistema de calefacción de cámara termostáticamente controlada, regulándolo a la temperatura del ensayo. Transcurrido este tiempo se saca la primera probeta del horno, se levanta la rueda, y se fija el molde con la probeta en los anclajes que para este fin lleva el carro móvil pequeño, sin que la rueda toque en ningún momento la superficie de la probeta. En estas condiciones se carga el brazo de soporte con las pesas necesarias para conseguir la presión especificada, se cierra la cámara y se espera unos 30 minutos con el objeto de homogenizar la temperatura del ensayo. Seguidamente se apoya la rueda cargada sobre la superficie de la probeta y se pone en marcha el carro durante tres pasadas completas, para conseguir un asentamiento de la rueda sobre la probeta. A continuación se para el carro y, situándolo en el punto de medida del micrómetro, se pone éste en cero. Se cierra entonces la ventana lateral y transcurridos unos cinco minutos se comienza el ensayo, poniendo en movimiento el carro durante un período de 120 minutos sin interrupciones, haciendo periódicamente las correspondientes lecturas de la deformación de acuerdo con el numeral 5.1. Una vez finalizado el ensayo, se detiene la máquina, se levanta la rueda (Nota 3), y se extrae la probeta ensayada, colocando, seguidamente, la siguiente y repitiendo el mismo procedimiento.

3.1.4. **Resultados**

- *Obtención de los resultados* – Se determinarán y anotarán 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.

- *Graficas de resultados* - Una vez ensayadas todas las probetas, se calculan los valores medios de todas las deformaciones de la mezcla y se llevan a un gráfico en donde se dibuja la curva de deformación.

3.2. METODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE DE MEZCLAS BITUMINOSAS SUJETAS A CARGA REPETIDA (BS- 226)

Es un método para calcular la resistencia a la deformación permanente de mezclas bituminosas. El método se aplica a los especímenes de ensayo cilíndrica con un espesor entre 30mm y 75mm y diámetro de 100mm, 150mm o 200mm.

3.2.1. Equipo de ensayo

El equipo N.A.T (Nottingham Asphalt Tester) fue diseñado para evaluar las propiedades mecánicas de materiales asfálticos para pavimentos (figura 13); esta máquina permite la realización de nuevos diseños de mezcla, la caracterización de nuevos materiales, la valoración de pavimentos en servicio, y el control de calidad.



Figura 11. Equipo N.A.T.

3.2.2. Modo de prueba

El equipo consta de un marco de carga, un sistema hidráulico, un sistema de adquisición de datos con panel de control, transductores y una cámara de temperatura controlada. Este marco servo-hidráulico facilita la realización de las pruebas con muestras elaboradas en laboratorio o directamente de la vía (núcleos).

El marco de carga consta de una placa base, una cabeza móvil en acero inoxidable que soporta al cilindro pistón y en el movimiento, genera deflexiones mínimas; un cilindro pistón hidráulico para la aplicación de cargas verticales de 0 a 10 kN, con frecuencias hasta de 50 Hz, y con una exactitud de 0.001 kN, además cuenta con un LVDT (transductor de desplazamiento) fijado en la parte superior del móvil. La celda de carga junto a los transductores de desplazamiento LVDT presentan los valores de esfuerzo aplicado y deformación obtenida.

La cámara de temperatura controlada (CRT) puede establecer temperaturas en el rango de -10° a 60° C, con una fluctuación en la temperatura dentro de la cabina de $\pm 0.2^{\circ}$ C, y una unidad de cambio de 0.5° C.

Resistencia a la deformación permanente bajo carga repetida:

Determina las características de deformación de la mezcla asfáltica, para muestras cilíndricas preparadas en laboratorio o núcleos tomados en campo.

El esfuerzo de compresión axial es de 100 ± 2 kPa, hasta que se apliquen un número N de repeticiones de carga establecidas.

Las condiciones normales del ensayo son:

- Temperatura de ensayo = 40° C,
- Carga de ensayo = 100 kPa,

- Carga de acondicionamiento = 10% de la carga de ensayo = 10 kPa,
- Número de ciclos de carga = 3600,
- Número de ciclos de reposo = 900 al finalizar los 3600 ciclos de carga.

La aplicación de la carga consiste en 3600 ciclos, en donde cada ciclo consta de 1 segundo de carga y 1 segundo de reposo; por lo que este periodo dura 2 horas.

3.2.3. Muestras de analisis

3.2.3.1. Preparación

En muestras de campo de utilizar la sierra, recorte la parte interior o muestra de material presentado para las piezas de prueba de forma de un cilindro derecho nominal. En su caso, retirar virutas recubiertas por la superficie de corte al ras. Abrazadera de la muestra en la plantilla y vio en rodajas con un espesor de el rango de 40mm a 100mm, cada rebanada que constituyen una prueba de las muestras.

3.2.3.2. Las condiciones de almacenamiento

Si el período de almacenamiento sea inferior a 4 días la temperatura de conservación no será superior a 25C. Para el almacenamiento de más de 4 días, la temperatura no será superior a 5C. Las temperaturas de almacenamiento y la hora se registrarán. Muestras deberán estar almacenadas en una cara plana sobre una superficie horizontal y no podrá ser apilado.

3.2.3.3. Acondicionamiento y pruebas temperatura

La muestra se colocará en un ambiente con temperatura controlada y vigilada hasta que se haya alcanzado la temperatura de ensayo. La temperatura de la muestra se determinará mediante la colocación de una muestra simulada, con termopares en la superficie y en el centro, junto a la muestra de la prueba. La temperatura de la muestra simulada se monitores hasta las mediciones indican

que la muestra ha alcanzado la temperatura de ensayo y la diferencia de temperatura entre el exterior y el centro no es superior a 0,4 grados centígrados. La media de las temperaturas y luego se inscribirá en la temperatura real de la muestra. La muestra se trasladó hasta el punto de prueba de una muestra simulada segundo, nominalmente idéntico al descrito anteriormente, es que se le mantenga al lado del punto de prueba. Las temperaturas de cada termopar se registrarán con una precisión de $\pm 0.2C$.

3.2.4. Procedimiento de medición

Reducir la carga acondicionada superpuesta después de un período, sin perjuicio de los ejemplares a las solicitudes repetidas de la tensión axial.

La tensión axial, la duración de carga y el período de descanso Transcurrirá aplicaciones sucesivas de carga se hará de conformidad con la carga del sistema. Medir las deformaciones axiales de las muestras como la prueba progresa con transductores de desplazamiento eléctrico y un sistema de adquisición de datos. Registrar la tensión axial% y el factor de la zona de carga después de cada aplicación de la carga 10 hasta 100 aplicaciones de carga y, posteriormente, cada carga de 100 solicitudes hasta el final del período de prueba especificado o hasta el fallo, si esto ocurre primero.

3.2.5. Calculo de la deformación axial

Calcular la deformación axial de la muestra de análisis, la deformación medida en el extremo del período de descanso inmediatamente después de la aplicación de la carga de conformidad con el sistema de carga.

3.2.6. Presentación de resultados

Preparar un gráfico de escala logarítmica que muestra la relación entre la tensión axial % y el número de aplicaciones de carga. Presentar el gráfico con el informe de la prueba.

3.3. ENSAYO DE RUEDA CARGADA DEL ANALIZADOR DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS (A.P.A.)

El analizador de pavimentos asfálticos es una modificación del Georgia Loaded Wheel Tester (GLWT). Mediante el ensayo de rueda cargada en el APA, es posible realizar la evaluación de la susceptibilidad de la mezcla asfáltica a la deformación permanente.



Figura 12. Analizador de Pavimentos Asfálticos (A.P.A.)

La evaluación de la susceptibilidad a la deformación permanente de las mezclas asfálticas se puede determinar tanto en especímenes rectangulares como en cilíndricos, mediante cargas repetidas aplicadas con ruedas y midiendo la profundidad de la huella que deja la rueda. El APA cuenta con un sistema de adquisición de datos automatizado.

3.3.1. Modo de prueba

Previamente al ensayo, se acondicionan las probetas en el horno a la temperatura de prueba (64° C) por un espacio de 6 h, para ello se introduce la temperatura en el panel de control principal del equipo, seguido de esto, se lleva a cabo la calibración de las ruedas del A.P.A. mediante una celda de carga, a fin de asegurar que cada rueda aplique una fuerza de 100 lb, durante el desarrollo de la prueba.

En el panel de control del ensayo de deformación permanente se especifica el tipo de probeta (viga o moldes cilíndricos); número de ciclos; presión de las mangueras; posición de los medidores de deformación (LVDT), entre otros parámetros. La prueba se ejecuta a 8000 ciclos, con una presión de aire en las mangueras de 100 lb/pulg². Una vez que el equipo ha alcanzado los 64° C, se retiran las probetas del horno y se colocan dentro de los moldes de plástico, mismos que se introducen en el A.P.A., de tal forma que queden centrados por debajo de cada rueda (figura 13 izquierda).



Figura 13. Evaluación de la deformación permanente en el A.P.A.

La prueba termina una vez se completan los 8 000 ciclos, la figura 13 derecha, muestra la apariencia de las probetas después del ensayo de deformación permanente en el Analizador de Pavimentos Asfálticos.

3.3.2. Ventajas

- Cada espécimen puede estar sujeto a un diferente nivel de carga.
- Las partes de la rueda de carga y la presión de inflado son representativas de las condiciones actuales en campo.
- Pueden probarse seis cilindros a la vez bajo temperaturas controlables, tanto en condición seca como en húmeda.
- Este ensayo tiene el potencial de ser adoptado rápidamente como prueba de desempeño.

3.4. ENSAYO DE RODERAS FRANCES

Ensayo de pista realizado mediante el dispositivo LCPC: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, para la medición de las huellas creadas por el paso repetido de una llanta sobre una muestra de pavimento.

La máquina ensaya dos muestras a la vez usando dos llantas simultáneas, la carga de llanta en las dos placas debe ser igual para evitar presiones asimétricas en el armazón de la llanta. Sin embargo, las dos placas no tienen que ser replicas exactas, de hecho, se recomienda ensayar mezclas diferentes para calcular las variables asociadas con la variación sobre el tiempo. Cuando se van a ensayar placas con las mismas características, se hace en tiempos diferentes, usando ambos lados de la máquina.

La susceptibilidad al rutting se basa en el criterio de rodada/falla. Esta máquina es usada en Francia para evaluar las mezclas que no tienen ninguna historia de desempeño o que serán sujetas a tráfico pesado, y en la actualidad ha comenzado a usarse en Los Estados Unidos.



Figura 14. Máquina de ensayo LCPC

3.4.1. Modo de prueba

La susceptibilidad al rutting se mide usando una llanta neumática de caucho con presiones de inflado de 0.6 ± 0.03 MPa. La llanta pasa sobre el centro del espécimen dos veces por segundo y el tiempo de carga en dicho punto es aproximadamente 0.1 segundos.

Las placas del espécimen de pavimento tienen una longitud de 500 mm por 180 mm de ancho y un grosor de 50 ó 100 mm, pueden ser ensayadas a temperaturas desde los 30° a 70° C, a una velocidad de 194.44 cm/sg. (67 ciclos por minuto).

También se pueden ensayar muestras con grosores entre 20 y 100 mm, fabricando un molde para tamaños no estandarizados, o colocando la placa sobre yeso o placas de acero. Se pueden ensayar mezclas preparadas y compactadas en laboratorio o pequeños especímenes cortados de pavimentos reales, pero éstos últimos deben ser cortados de manera que quepan dentro del molde para que se ajusten al equipo, asegurándolos de alguna forma, puede ser con yeso. La base y los lados del molde que sostienen a la placa son de acero rígido, además la placa debe estar compactada al menos con dos o tres niveles de vacíos; luego de la compactación, la placa es envejecida en un cuarto a temperatura por 7 días.

Los gatos hidráulicos situados debajo de las placas, las empujan hacia arriba creando de esta forma la carga, la carga estándar es de 5000+/- 50 N, y la máxima carga que se puede aplicar es de 5500 N; la presión se gradúa en el panel de control de la máquina para una presión dada en cada gato hidráulico, calibrándolas en incrementos de 0.1 MPa por medio de una celda de carga.

Finalizado el ensayo, se calcula la deformación, definida como la media de 15 mediciones de profundidad de huella, medidas en cinco hileras paralelas a lo largo, y tres hileras distribuidas a lo ancho de la muestra.

La deformación plástica es medida por un porcentaje relativo de reducción en el espesor de la muestra en el trayecto de la rueda, el ensayo es terminado después de 105 ciclos a menos que la profundidad de la rodera exceda el 15% antes de llegar a este número de ciclos. Generalmente, se miden las profundidades de huella para los 30, 100, 300, 1.000, 3.000 y 100.000 ciclos de la prueba; el rango de temperatura en el que se realiza el ensayo varía entre los 50° C y los 60° C, buscando representar las condiciones mas desfavorables esperadas.

Cuando se ensayan placas de 50 mm, de acuerdo a las especificaciones francesas, la mezcla es aceptable si el porcentaje de profundidad de huella promedio para 1000 y 3000 ciclos es menor o igual que 10 y 20% respectivamente. Cuando se ensaya la placa de 100 mm, el porcentaje promedio de profundidad de rodera luego de 30.000 ciclos debe ser menor o igual al 10%.



Figura 15. Acercamiento de la llanta y la placa en el ensayo de rodera francés

3.4.2. Ventajas

- Es un ensayo que permite prevenir daños por ahuellamiento en la mezcla

3.4.3. Limitaciones

- El método no es válido para mezclas con tamaño máximo nominal de agregados mayor a 20mm.
- Se presentan estados de esfuerzo complejos y desconocidos en la placa que limitan su aplicación.
- Los datos obtenidos de este ensayo no se pueden usar en análisis mecanicistas de pavimentos y tampoco para determinar los módulos de la mezcla o los coeficientes de la capa usados por la AASHTO en sus procedimientos de diseño.

3.5. ENSAYO DE PISTA DE LA UNIVERSIDAD PURDUE

Este ensayo de rueda cargada se desarrolló en la Universidad de Purdue, y presenta similitud con el ensayo de Hamburgo, ya que permite determinar el ahuellamiento potencial y sensibilidad a la acción de la humedad.

3.5.1. Modo de prueba

Este dispositivo aplica una presión de 620 kPa sobre la muestra, ya sea extraída de campo o preparada en laboratorio, con una velocidad de 33.2 cm/sg, a través de una rueda neumática inflada a una presión de 793 kPa. Para los especímenes fabricados en laboratorio, las dimensiones son de 50 cm de longitud, 18 cm de ancho y 1 a 5 cm de espesor; las muestras de núcleos extraídos de campo son rectangulares, de 29 cm x 31 cm, y su espesor está en función del tipo de mezcla que se esté ensayando: superficiales, 3.8 cm; mezclas de base, 5.1 cm; y mezclas asfálticas gruesas para base, 7.6 cm. Estas se compactan por medios de compactación lineales, con contenidos de vacíos entre 6 y 8%.

El ensayo se realiza hasta los 20000 pases de ida y vuelta, o hasta que se presenten 2 cm de ahuellamiento. Finalizado el ensayo, se procede a obtener el coeficiente de humedad, definido como la relación entre el número de ciclos para los que se alcanza una huella de 1.27 cm.



Figura 16. Máquina de ensayo, Laboratorio de la Universidad Purdue

3.5.2. Ventajas

- El ensayo se puede realizar para condiciones secas o húmedas.

- Puede adaptarse una rueda móvil, con la cual que simular un movimiento en sentido transversal en el ancho de la muestra.

3.6. ENSAYO DEL MODELO MOVIL DE SIMULACION DE CARGA

El modelo móvil de simulación de carga (M.M.L.S.) se desarrolló recientemente en Sudáfrica y puede evaluar el desempeño del pavimento en términos de rutting, en laboratorio o en campo bajo varias condiciones ambientales y de edad.

3.6.1. Modo de prueba

El MMLS consiste de cuatro ejes, cada uno con una llanta neumática de 300 mm de diámetro, circulando en un circuito cerrado vertical. Las llantas están soportadas en carretillas que se encuentran unidas por una cadena continua. Un motor eléctrico se usa para rotar el cilindro móvil, el cual arrastra las llantas del ensayo a través del pavimento. Los neumáticos pueden desplazarse lateralmente +/- 80 mm, Alrededor del eje central, haciendo a la trayectoria de la llanta de 240mm de ancho.

La velocidad nominal de la rueda es de 2.5 m/s, que equivale a la aplicación de 7200 cargas de rueda por hora, pero si se desea, se pueden seleccionar velocidades más lentas. La temperatura aplicada varía según la condición del ensayo: 50° C y 60° C para condiciones secas, y 30° C para condición húmeda.

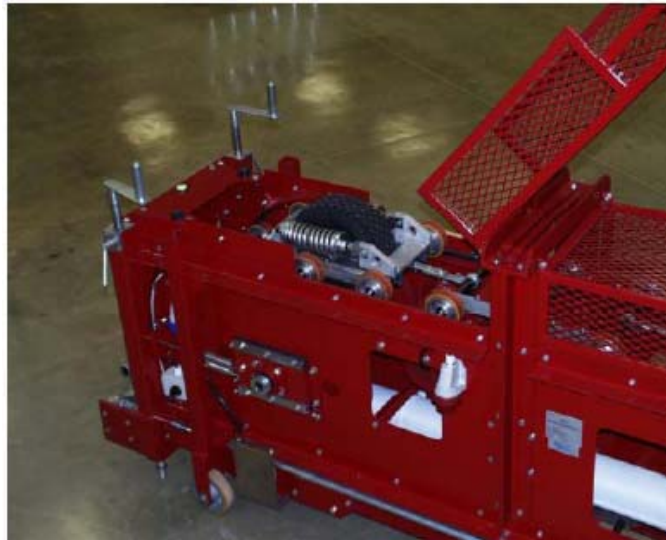
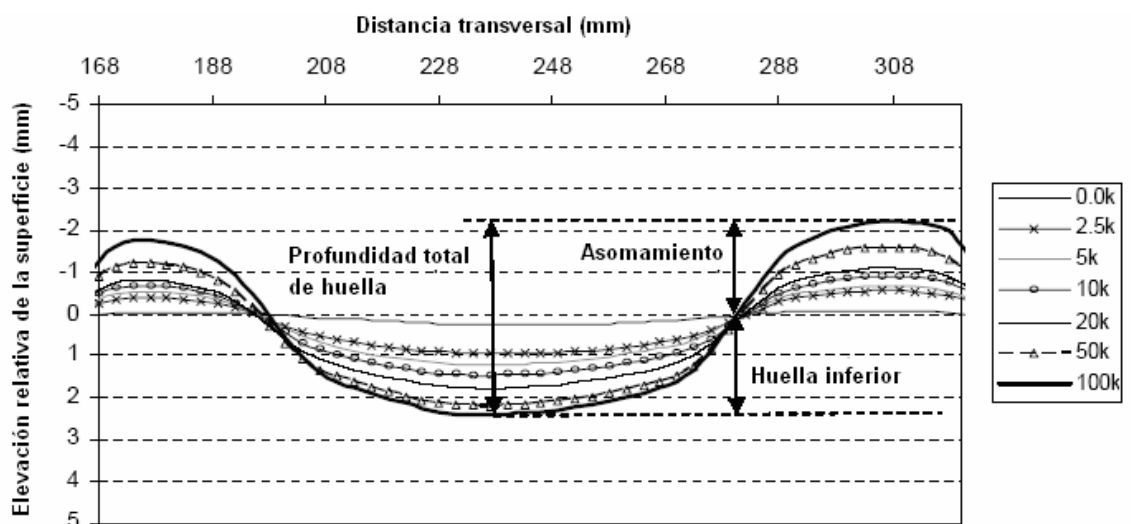


Figura 17. Modelo móvil de simulación de carga

Los valores medidos en el ensayo son los de profundidad de huella en los perfiles transversales, los cuales se utilizan para determinar el Módulo de Análisis Sísmico de Onda de Superficie, el cual permite evaluar el ahuellamiento o daños producidos por agrietamiento o humedad.

Los datos de salida del ensayo aparecen como el perfil mostrado en la figura 22.



Gráfica 8. Datos de salida típicos de las lecturas del perfilómetro

3.6.2. Ventajas

- Las aplicaciones del dispositivo incluyen ensayos en campo, ensayos en laboratorio, muestras extraídas de campo, especímenes cilíndricos preparados en laboratorio, placas de prueba preparadas en laboratorio perfiles de pavimentos preparados en laboratorio.
- Posibilidad de realizar el ensayo en seco o en condiciones húmedas.
- Si el ensayo no se realiza a temperatura ambiente, ésta puede controlarse dentro de un rango de -5° a 60° C.

4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

Este proyecto investigativo se llevo a cabo con el fin de establecer la influencia en la deformación permanente del materia granular fino, haciendo variaciones en los porcentajes de las arenas (río y de trituración) de la franja central de la MDC-2 para mezclas asfálticas densas en caliente de acuerdo a la especificación de construcción de carreteras del INVIAS/07.

- Se documenta todo lo referente al estudio de las deformaciones permanentes en pavimentos, basándose en textos, artículos en internet, tesis de grado y normas acerca de de el proyecto de investigación.
- Se adquiere la materia prima para la preparación de las preparación de las mezclas y probetas que son ensayadas, estos son los agregados pétreos de la fuente Pescadero, ubicada a 50 Km. aproximadamente sobre la vía Bucaramanga - San Gil y los asfaltos convencionales y modificado.
- Se definen los ensayos de laboratorio necesarios para el análisis y caracterización de los agregados pétreos y los asfaltos.
- Una vez caracterizados y analizados los materiales, se llevan a su ejecución, preparando las mezclas con la metodología del diseño marshall, y trabajando la franja central de la MDC-2 para mezclas asfálticas densas en caliente de acuerdo a la especificación de construcción de carreteras del INVIAS/07.
- Ya preparadas las probetas con las diferentes combinaciones de porcentajes de agregados finos (río y trituración) y los tres tipos de asfalto se les hace el ensayo de deformación permanente especificado en la norma BS 226.
- Posterior a los ensayos de deformación permanente se hace un análisis de los resultados obtenidos en cada uno de estos.

4.1. CARACTERIZACIÓN FISCOQUIMICAS DE LAS MUESTRAS DE ASFALTOS.

4.1.1. Generalidades

Tabla 4. Descripción de las muestras

TIPO	DESCRIPCION
convencional	ASFALTO 60/70
convencional	ASFALTO 80/100
modificado	CARIPHALTE PM TIPO II

4.1.2. Resultados

Tabla 5. Resultados Propiedades Físicoquímicas para la muestra de asfalto convencional 60-70

Propiedad	Valor	Especificación ³	
		Mín.	Máx.
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0.1mm)	61	60	70
Ductilidad a 25°C y 5cm/s (cm)	>140	100	-
Punto de ablandamiento (°C)	49,4	-	-
Viscosidad dinámica a 60°C y 300mmHg (Poises)	2125,576	1500	
Contenido de agua (% volumen)	0,0	-	0,2
Solubilidad en tricloroetileno (% peso)	99,25	99,0	-
Punto de ignición en copa abierta Cleveland (°C)	-	230	-
Índice de penetración	0,4	- 1,0	+ 1,0
Pérdida de masa, RTFOT a 163°C y 85min (%peso)	0,233	-	1,0
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0.1mm) al asfalto RTFO	35,7	-	-
Penetración residual (%)	58,52	52	-
Punto de ablandamiento, asfalto RTFO (°C)	54,3		
Incremento del punto de ablandamiento, (°C)	4,9	-	5

Fuente. Certificado de análisis Shell Bitumen.

³ Especificaciones INVIAS del Cemento Asfáltico 60-70. Artículo 400- 07. Tabla 400.3.

Tabla 6. Resultados Propiedades Fisicoquímicas para la muestra de asfalto convencional 80-100

Propiedad	Valor	Especificación ⁴	
		Mín.	Máx.
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0.1mm)	81	80	100
Ductilidad a 25°C y 5cm/s (cm)	>140	100	-
Punto de ablandamiento (°C)	46,7	-	-
Viscosidad dinámica a 60°C y 300mmHg (Poises)	1374,880	1000	
Contenido de agua (% volumen)	0,0	-	0,2
Solubilidad en tricloroetileno (% peso)	99,45	99,0	-
Punto de ignición en copa abierta Cleveland (°C)	-	230	-
Índice de penetración	0,4	- 1,0	+ 1,0
Pérdida de masa, RTFOT a 163°C y 85min (%peso)	0,307	-	1,0
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0.1mm) al asfalto RTFO	44,7	-	-
Penetración residual (%)	55,19	48	-
Punto de ablandamiento, asfalto RTFO (°C)	53,3		
Incremento del punto de ablandamiento, (°C)	6,6	-	5

Fuente. Certificado de análisis Shell Bitumen.

Tabla 7. Resultados Propiedades Fisicoquímicas para la muestra de asfalto modificado CARIPHALTE PM – Tipo II

Propiedad	Valor	Especificación	
		Mín.	Máx.
Penetración a 25°C, 100g y 5s (0.1mm)	60	55	70
Ductilidad a 5°C y 5cm/min (cm)	20.5	15	-
Punto de ablandamiento (°C)	59.9	58	-
Recuperación elástica por torsión a 25°C (%)	52.0	40	-
Contenido de agua (% volumen)	0,1	-	0,2
Punto de chispa (°C)	230	-	295
Estabilidad al almacenamiento (diferencia en el punto de ablandamiento) (°C)	0.8	-	5
Peso específico a 25 °C	1.006	-	-
Temperatura de mezcla (°C)	165-169	-	-

⁴ Especificaciones INVIAS del Cemento Asfáltico 80-100. Artículo 400- 07. Tabla 400.3.

Propiedad	Valor	Especificación	
		Mín.	Máx.
Temperatura de compactación (°C)	156-160	-	-
ENSAYO EN HORNO DE PELICULA FINA EN MOVIMIENTO, RTFOT, 85 min, 163 ASTM D-2872			
Pérdida de masa (%)	0.3552		1.0
Ductilidad a 5°C y 5cm/min (cm)	16	8	
Penetración retenida (%)	67.19	65	-

Fuente. Certificado de análisis Shell Bitumen.

Los valores de las propiedades fisicoquímicas del asfalto se presentan en las tablas 5,6 y 7 comparados con los valores exigidos por el INVIAS.

4.2. CARACTERIZACION FÍSICO MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS

4.2.1. Generalidades

En el proyecto en investigación se utilizaron agregados pétreos de la fuente Pescadero, ubicada a 50 Km. aproximadamente sobre la vía Bucaramanga - San Gil estos fueron aportados en su totalidad por la empresa de fabricación de mezclas asfálticas PAVIMENTOS ANDINOS, para la ejecución de los diferentes ensayos de laboratorio que permitan desarrollar y analizar este trabajo..

4.2.2. Resultados

Se determinaron las propiedades de consenso especificada por el Instituto Nacional de Vías en su artículo 400-02.

Tabla 8. Resumen de ensayos a los materiales pétreos fuente Pescadero.

PROPIEDAD	NORMA	VALOR	ESP INVIAS-02
Equivalente de arena	E-133	54%	50% Min.
Porcentaje de caras fracturadas (una o más caras fracturadas)	E-227	85%	75% Min.
Porcentaje de caras fracturadas (dos o más caras fracturadas)	E-227	76%	-
Resistencia en sulfato de sodio	E-220	6.8%	12% Máx.
Contenido de impurezas	E-237	0.37	0.5 Máx.
Desgaste los Ángeles	E-218/219	23.8%	25% Máx.
Índice de alargamiento	E-230	24%	30% Máx.
Índice de aplanamiento	E-230	28%	30% Máx.
Angularidad del Agregado fino	AASHTO T-304	44%	> 40%)
Peso unitario en tolueno (gr/cm ³)	E - 225	0.81	-
Coefficiente de emulsibilidad	E -776	0.45	-
Concentración crítica del llenante mineral	E -745	0.38	-

Fuente: Reporte Técnico de Pavimentos Andinos.

Pesos Específicos de los Agregados

A continuación se presentan los resultados de los ensayos realizados para el cálculo de los pesos específicos de los agregados gruesos, arenas de trituración y de río y finos de la fuente pescadero.

Tabla 9. Peso específico de los agregados gruesos.

Peso específico agregado grueso (Retenido # 4)					
Peso Material (g)	Peso en agua (g)	Peso SSS (g)	Gsb	Gs Nominal	Absorción (%)
2997.5	1881.4	3021.1	2.63	2.69	0.79

Tabla 10. Peso específico de arenas de trituración

Peso específico arena (Pasa #4 – Ret. # 200)						
Peso Material (g)	W Matraz + arena + H2O (g)	W Matraz + H2O (g)	Peso SSS (g)	Gsb	Gs Nominal	Absorción (%)
492.8	2118.5	2428.0	500	2.59	2.69	1.46

Tabla 11. Peso específico de arenas de río

Peso específico arena (Pasa #4 – Ret. # 200)						
Peso Material (g)	W Matraz + arena + H2O (g)	W Matraz + H2O (g)	Peso SSS (g)	Gsb	Gs Nominal	Absorción (%)
489.5	2117.47	2424.3	500.2	2.58	2.68	2.19

Tabla 12. Peso específico del llenante mineral.

Peso específico filler (Pasa #200)			
Peso Material (g)	W Matraz + filler + H2O (gr)	W Matraz + H ₂ O (gr)	Gsb
224.6	2118.5	2259.0	2.67

4.3. PREPARACION DE PROBETAS POR LA METODOLOGIA MARSHALL

4.3.1. Mezcla de los agregados pétreos

4.3.1.1. Granulometría por tamizado

- En primera instancia antes de llevar a cabo el tamizado se debe preparar el material granular de río y trituración secando las muestras al sol hasta alcanzar una humedad de 0%, para dar cumplimiento a las indicaciones dadas por las normas del Instituto Nacional de vías (INVIAS).



Figura 18. Material pétreo extendido al sol

- Una vez seco el material granular de río y trituración me dispongo a llevar a cabo el tamizado y clasificar el material así;
 1. El agregado de trituración grueso lo clasifico en 3 fracciones:
 - a. *Pasa 3/4" – Retiene 1/2"*
 - b. *Pasa 1/2" – Retiene 3/8"*
 - c. *Pasa 3/8" – Retiene #4*
 2. Las arenas tanto de río como de trituración en 4 fracciones:
 - a. *Pasa #4 – Retiene #10*

- b. Pasa #10 – Retiene #40
- c. Pasa #40 – Retiene #80
- d. Pasa #80 – Retiene #200

3. Y el filler:

- a. Pasa #200



Figura 19. Material pétreo tamizado

- Ya distribuido el material según la cantidad requerida y solicitada en cada tamiz, se dispone a lavar en una tara los agregados gruesos y las arenas cada una sobre su tamiz retenido.
- Recién lavado el material se pone al sol o en un horno para así tener el material seco para poder mezclar.

4.3.1.2. Mezcla del agregado granular con los requerimientos de la franja media para una mezcla MDC-2.

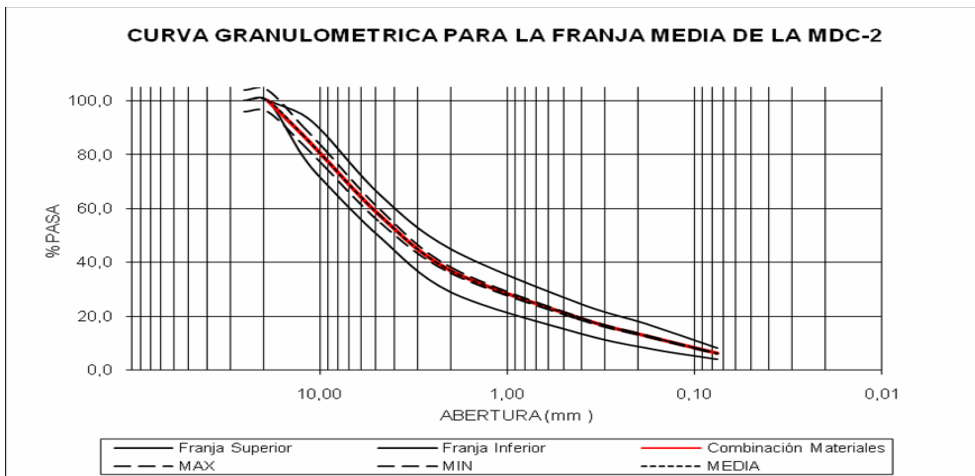
Debido a que el método Marshall no tiene en cuenta la evaluación de diferentes gradaciones sino que, simplemente, se escoge la gradación de diseño de tal

manera que cumpla lo descrito en la especificación, en el caso de este proyecto se escogió trabajar con la franja media para una mezcla tipo MDC-2 como se indica en la especificación anteriormente nombrada.

**Tabla 13. Franja media granulométrica para una mezcla tipo MDC-2
GRADACION MDC-2 SEGÚN INVIAS - 07**

Tamiz	Abertura (mm)	% pasa medio	Especificación	
1	25,400	100	100	100
3/4	19,000	100	100	100
1/2	12,500	88	80	95
3/8	9,500	79	70	88
N°4	4,750	57	49	65
N°10	2,000	37	29	45
N°40	0,425	20	14	25
N°80	0,180	13	8	17
N°200	0,075	6	4	8

La gráfica 6 muestra la curva granulométrica obtenida para la franja media de una mezcla de tipo MDC-2.



Gráfica 9. Curva Granulométrica de la franja media para mezclas MDC-2, frente a las especificaciones INVIAS para mezclas MDC-2.

Fuente. Gradación según especificación INVIAS

4.3.1.3. *Definición de las mezclas MDC-2 para 5 combinaciones de arena de río y trituración y 3 tipos de asfalto.*

Las siguientes tablas muestran los porcentajes de combinaciones de arena de río y trituración y la mezcla con los 3 tipos de asfaltos.

Tabla 14. Tipos de mezcla con asfalto convencional 60-70

ASFALTO CONVENCIONAL 60/70		
arena/comb	%RIO	%TRITURADA
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Tabla 15. Tipos de mezcla con asfalto convencional 80-100

ASFALTO CONVENCIONAL 80/100		
arena/comb	%RIO	%TRITURADA
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

Tabla 16. Tipos de mezcla con asfalto modificado cariofalte tipo II

ASFALTO MODIFICADO TIPO II		
arena/comb	%RIO	%TRITURADA
1	100	0
2	75	25
3	50	50
4	25	75
5	0	100

4.3.1.4. *Cantidades de material para la preparación de la mezcla MDC-2*

Según el diseño Marshall y una vez definidos los porcentajes de combinación de arenas de río y trituración debo preparar mezclas MDC-2 con una cantidad de material pétreo de 1150 g cada una.

Las cantidades a combinar serán mostradas en la tabla numero 17.

Tabla 17. Cantidad de material pétreo para cada combinación de arenas en las mezclas

%pasa	RIO							TRITURACIÓN				6
	13	9	22	20	18	7	7	20	18	7	7	
PASA	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#4	#10	#40	#80	#200
RET	1/2"	3/8"	#4	#10	#40	#80	#200	#10	#40	#80	#200	-----
100%R	143,8	97,8	253,0	230,0	201,3	80,5	74,8	0,0	0,0	0,0	0,0	69,0
75%R	143,8	97,8	253,0	172,5	150,9	60,4	56,1	57,5	50,3	20,1	18,7	69,0
50%R	143,8	97,8	253,0	115,0	100,6	40,3	37,4	115,0	100,6	40,3	37,4	69,0
25%R	143,8	97,8	253,0	57,5	50,3	20,1	18,7	172,5	150,9	60,4	56,1	69,0
0%R	143,8	97,8	253,0	0,0	0,0	0,0	0,0	230,0	201,3	80,5	74,8	69,0

Una vez definidas las cantidades retenidas en cada tamiz para la franja media de mezclas MDC-2 me dispongo a hacer la combinación de estas cantidades según el porcentaje de arena de río y trituración que disponga cada mezcla (1150g). Teniendo 5 combinaciones diferentes de % de arenas y 3 tipos de asfalto, ósea tengo 15 diferentes tipos de mezclas asfálticas.

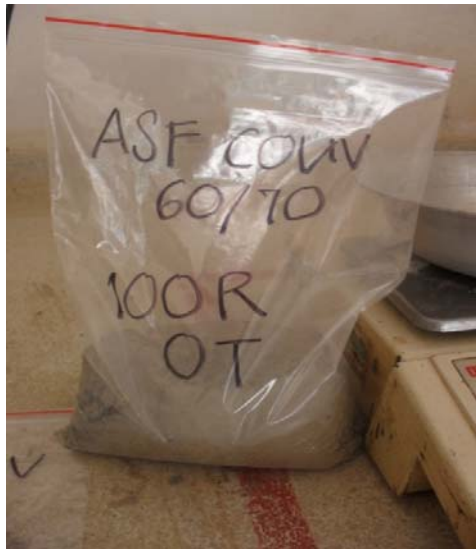


Figura 20. Combinación de agregados pétreos para una mezcla de la franja media de MDC-2

4.3.2. Mezcla asfáltica

4.3.2.1. Cantidad de materiales

Para cada tipo de probeta se necesitan aproximadamente 1200 g de ingredientes (1150g material pétreo y 50g material bituminoso) para una serie de muestras de la gradación dada. Se requiere, además, una cantidad extra de materiales para la determinación de las gravedades específicas.

4.3.2.2. Preparación de las mezclas

En bandejas taradas, separadas para cada fracción de la muestra, se pesarán sucesivamente las cantidades de cada porción de agregados, previamente calculadas de acuerdo con la gradación necesaria para la fabricación de cada probeta, de tal forma que ésta resulte con una altura de 63.5 ± 1.3 mm. Se calentarán los agregados en una plancha de calentamiento o en el horno a una temperatura de 28°C por encima de la temperatura de mezcla.

Se llevan los agregados al recipiente de pre-mezclado donde se mezclan en seco y se forma a continuación un cráter en su centro, dentro del cual se vierte el porcentaje requerida de asfalto (4.5% ,5% y 5.5% y luego calcula el porcentaje optimo de asfalto), debiendo estar ambos materiales en ese instante a temperaturas establecidas para el proceso de mezcla. A continuación se mezclan los materiales lo más rápidamente posible en el recipiente de premezclado y de allí se pasan a la olla de mezcla en la cual se mezclan los ingredientes por un tiempo no mayor a 2 minutos hasta obtener una mezcla completa y homogénea.



Figura 21. Elaboración de la mezcla

4.3.2.3. *Compactación de las probetas*

A la misma vez de la preparación de la mezcla, el conjunto de molde, collar, placa de base y la base del martillo de compactación, se calientan en el horno a una temperatura establecida. Se arma el conjunto del dispositivo para moldear las probetas y se coloca un papel de filtro en el fondo del molde antes de colocar la mezcla. A continuación, se coloca toda la mezcla recién fabricada (1180g) en el molde y se la golpea vigorosamente con una espátula, 15 veces alrededor del

perímetro y 10 sobre el interior. Se alisa la superficie hasta obtener una forma ligeramente redondeada. La temperatura de la mezcla antes de la compactación deberá hallarse dentro de los límites de temperatura de compactación establecidos. Se pone el collar y se coloca el conjunto en el sujetador sobre el pedestal de compactación. Se coloca otro papel filtro sobre la superficie de la mezcla y se aplican 75 golpes por cada cara, empleando para ello el martillo de compactación.

4.3.2.4. *Calculo del porcentaje de vacios*

Luego de determinar la gravedad específica bulk de la mezcla compactada mediante las normas INV E – 733, Se determina la gravedad específica máxima teórica (Gmm) mediante la norma INV E – 735, sobre una mezcla asfáltica comparable.

Se halla el porcentaje de vacios llenos de aire de cada briqueta del diseño Marshall, hasta encontrar el porcentaje “optimo” de asfalto para cada una de las mezclas asfálticas densas en caliente de tipo MDC-2 (4% - 6%).



Figura 22. Ensayo de gravedad específica máxima teórica (Gmm).

A continuación se ilustra un ejemplo de cálculo de % de vacíos llenos de aire para la briqueta de diseño Marshall 100R-0T 60-70 (5.2% Asf. optimo)

- *Ensayo de gravedad bulk para mezcla 100R-0T 60-70 (5.2% Asf Opt..)*

TEMP	25,3
GMM	2,448
K	0,999921

% ASF.	BRIQ. #	W seco	W sum	W sss	Gbulk	Densidad	absorcion	%Va
5.2	100R-60/70	1150.9	654.1	1151.7	2.313	2305.78	0.16	5.3

ALTURA (mm)

ESPECIMEN N°	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _{MEDIA}
100R-60/70	62.05	62.25	62.45	62.55	62.35

DIAMETRO (mm)

ESPECIMEN N°	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D _{MEDIA}
100R-60/70	101.90	102.00	101.80	101.55	101.70	101.60	101.80

Tabla 18. Resumen de resultados de probetas de diseño Marshall

TIPO DE ASFALTO	COMBINACION	%ASF OPTIMO	GMM final	Gbulk	Densidad	Absorción	%Va final
60/70	100R - 0T	5,2	2,441	2.313	2305.78	0.16	5,3
60/70	75R - 25T	5	2,450	2.341	2334.03	0.30	4,4
60/70	50R - 50T	5	2,477	2.372	2364.61	0.10	4,2
60/70	25R - 75T	4,7	2,484	2.352	2344.49	0.46	5,3
60/70	0R - 100T	4,7	2,482	2.384	2376.89	0.22	4
80/100	100R - 0T	5,2	2,44	2.323	2316.50	0.08	4,8
80/100	75R - 25T	4,7	2,47	2.351	2344.40	0.12	4,8
80/100	50R - 50T	5	2,469	2.347	2339.78	0.22	4,9
80/100	25R - 75T	4,7	2,474	2.370	2362.59	0.16	4,2
80/100	0R - 100T	4,7	2,475	2.384	2376.61	0.14	4

TIPO DE ASFALTO	COMBINACION	%ASF OPTIMO	GMM final	Gbulk	Densidad	Absorción	%Va final
mod tipo II	100R - 0T	5,5	2,433	2.331	2324.36	0.08	4,7
mod tipo II	75R - 25T	5,3	2,438	2.354	2347.16	0.10	4,1
mod tipo II	50R - 50T	5	2,459	2.319	2311.95	0.08	5,7
mod tipo II	25R - 75T	5,3	2,456	2.343	2336.42	0.14	4.0
mod tipo II	0R - 100T	5,4	2,446	2.336	2328.87	0.08	4

4.3.2.5. *Calculo de estabilidad y flujo*

Después de colocar las probetas en un baño de agua durante 30 o 40 minutos, Se aplica, a continuación, la carga sobre la probeta con la prensa hasta que ocurra la falla, es decir cuando se alcanza la máxima carga, Se anota el valor máximo de carga registrado y la lectura de deformación.

Tabla 19. Resultados de Estabilidad y Flujo de probetas

TIPO DE ASFALTO	COMBINACION	%ASF OPTIMO	Carga Maxima (N)	Flujo (mm)
60/70	100R - 0T	5,2	17694	3,07
60/70	75R - 25T	5	14887	3,16
60/70	50R - 50T	5	17715	3,79
60/70	25R - 75T	4,7	15939	3,48
60/70	0R - 100T	4,7	19159	2,73
80/100	100R - 0T	5,2	14607	3,47
80/100	75R - 25T	4,7	16775	3,48
80/100	50R - 50T	5	17432	3,47
80/100	25R - 75T	4,7	18560	2,91
80/100	0R - 100T	4,7	17785	3,24
mod tipo II	100R - 0T	5,5	20713	3,28
mod tipo II	75R - 25T	5,3	21682	3,45
mod tipo II	50R - 50T	5	24083	3,62
mod tipo II	25R - 75T	5,3	18736	3,88
mod tipo II	0R - 100T	5,4	20098	4,50

4.3.3. Compactación Giratoria SUPERPAVE

Una vez obtenido el porcentaje de asfalto óptimo para cada tipo de mezcla MDC-2, se prepara la mezcla.

A continuación, se coloca toda la mezcla recién fabricada (1180g) en un recipiente de vertimiento a la temperatura establecida y allí con el este debidamente tarado se pesan exactamente 1150g de mezcla, ahora si se vierte la mezcla sobre el molde y se la golpea vigorosamente con una espátula, 15 veces alrededor del perímetro y 10 sobre el interior. Se alisa la superficie hasta obtener una forma ligeramente redondeada.

Enseguida se le pone un papel de filtro sobre la mezcla y se saca la tapa superior del molde y se ubica sobre la mezcla con la ayuda de la varilla imanada.

Después de la compactación, se retira el molde del compactador, se retira la tapa superior con la ayuda de la varilla imanada y se pone el molde en el gato hidráulico del compactador donde es retirada la briqueta cuidadosamente y se deja enfriar la muestra al aire. Se identifica con la crayola, y se coloca sobre una superficie plana, lisa, donde se deja en reposo durante una noche.

4.3.3.1. Compactación de las probetas de prueba (giros)

Las briquetas de prueba se compactan de la siguiente forma;

- Una vez puesta la mezcla en el molde e introducida al compactador, me dirijo a la pantalla digital de este y allí selecciono la modalidad de compactación, en este caso selecciono por numero de giros.

- Para cada tipo de mezcla realizo dos compactaciones de prueba, la primera con 50 giros y la segunda con 170 giros según lo indica el método de compactación superpave.
- Una vez retirado el plato de carga y terminada la compactación, tomo nota de la altura de la briqueta, debido a que esta altura variara cuando la briqueta se seque a la temperatura ambiente. Y la necesito para la compactación de las briquetas definitivas.
- Listas las probetas las identifico (1P; 50giros – 2P; 170giros) y ejecuto lo descrito los ensayos descritos en el numeral 4.3.2.4.

A continuación se ilustran un ejemplo del cálculo de % de vacios llenos de aire para las briquetas de prueba (1P; 50giros – 2P; 170giros) 50R-50T 80-100

TEMP	25,2
GMM	2,469
K	0,999948

No	Giros	% ASF	BRIQ. #	W seco	W sum	W sss	Gbulk	Densidad	absorción	%Va
1P	50	5	50R-80/100	1151,3	655,3	1154,2	2,308	2301,07	0,58	6,5
2P	170	5	50R-80/100	1149,8	670,8	1150,8	2,395	2387,81	0,21	3

ALTURA (mm)

No	Giros	ESPECIMEN N°	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _{MEDIA}	H _{INMEDIATO}	H _{RECUP}	H _{REC.PROM}
1P	50	50R-80/100	64,25	64,30	64,15	64,20	64,2	63,70	0,53	0,46
2P	170	50R-80/100	62,00	61,95	62,00	62,00	62,0	61,60	0,39	0,46

RELACION ALTURA -VACIOS

No.	Altura (mm)	% Vacios
1P	64,2	6,5
2P	62,0	3,0

Ahora entro a la curva compactación, y con los valores de % vacios requeridos se calcula la altura de la probeta ($H_{REC.PROM}$).

% vacios req.	$H_{(mm)}$	$H_{REC.PROM(mm)}$	$H_{DEFINITIVA(mm)}$
4,9	63,2	0,46	62,7

Tabla 20. Resumen de los resultados de las probetas de prueba con asfalto convencional 60-70

No	Giros	BRIQ.	G_{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H_{MEDIA}	$H_{INMEDIATO}$
1P	50	100R - 0T	2,254	2247,23	0,39	8	65,98	65,70
2P	170	100R - 0T	2,305	2298,08	0,26	5,9	64,09	63,60
1P	50	75R - 25T	2,317	2310,04	0,34	5,4	64,23	63,80
2P	170	75R - 25T	2,363	2355,91	0,23	3,6	62,31	61,90
1P	50	50R - 50T	2,328	2321,01	0,53	6	63,48	62,90
2P	170	50R - 50T	2,404	2396,78	0,15	2,9	61,84	61,40
1P	50	25R - 75T	2,351	2343,94	0,39	5,4	63,30	62,80
2P	170	25R - 75T	2,384	2376,84	0,31	4	62,33	61,70
1P	50	0R - 100T	2,328	2321,01	0,53	6,2	64,00	63,50
2P	170	0R - 100T	2,397	2389,8	0,53	3,4	62,00	61,30
No	Giros	BRIQ.	H_{RECUP}	$H_{REC.PROM}$	% Va req	$H_{(mm)}$	$H_{REC.PROM}$	$H_{DEFINITIVA(mm)}$
1P	50	100R - 0T	0,27	0,38	5,3	63,56	0,38	63,2
2P	170	100R - 0T	0,49	0,38	5,3	63,56	0,38	63,2
1P	50	75R - 25T	0,42	0,41	4,4	63,17	0,41	62,8
2P	170	75R - 25T	0,41	0,41	4,4	63,17	0,41	62,8
1P	50	50R - 50T	0,58	0,51	4,2	62,51	0,51	62,0
2P	170	50R - 50T	0,44	0,51	4,2	62,51	0,51	62,0
1P	50	25R - 75T	0,50	0,56	5,3	63,26	0,56	62,7
2P	170	25R - 75T	0,62	0,56	5,3	63,26	0,56	62,7
1P	50	0R - 100T	0,50	0,60	4	62,4	0,6	61,8
2P	170	0R - 100T	0,70	0,60	4	62,4	0,6	61,8

Tabla 21. Resumen de los resultados de las probetas de prueba con asfalto convencional 80-100

No	Giros	BRIQ.	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H _{MEDIA}	H _{INMEDIATO}
1P	50	100R - 0T	2,326	2319,02	0,44	4,7	63,00	62,40
2P	170	100R - 0T	2,355	2347,94	0,25	3,5	63,85	63,30
1P	50	75R - 25T	2,298	2291,11	0,52	7,0	64,34	63,70
2P	170	75R - 25T	2,366	2358,90	0,43	4,2	62,85	62,40
1P	50	50R - 50T	2,308	2301,08	0,58	6,5	64,23	63,70
2P	170	50R - 50T	2,395	2387,82	0,21	3,0	61,99	61,60
1P	50	25R - 75T	2,356	2348,93	0,41	4,8	63,04	62,50
2P	170	25R - 75T	2,395	2387,82	0,27	3,2	62,01	61,50
1P	50	0R - 100T	2,327	2320,02	0,83	6,0	64,09	63,50
2P	170	0R - 100T	2,422	2414,73	0,13	2,1	61,49	61,00
No	Giros	BRIQ.	H _{RECUP}	H _{REC.PROM}	% Va req	H _(mm)	H _{REC.PROM}	H _{DEFINITIVA(mm)}
1P	50	100R - 0T	0,60	0,58	4,8	62,91	0,58	62,3
2P	170	100R - 0T	0,55	0,58	4,8	62,91	0,58	62,3
1P	50	75R - 25T	0,64	0,54	4,8	63,17	0,54	62,6
2P	170	75R - 25T	0,45	0,54	4,8	63,17	0,54	62,6
1P	50	50R - 50T	0,53	0,46	4,9	63,2	0,46	62,7
2P	170	50R - 50T	0,39	0,46	4,9	63,2	0,46	62,7
1P	50	25R - 75T	0,54	0,52	4,5	62,86	0,52	62,3
2P	170	25R - 75T	0,51	0,52	4,5	62,86	0,52	62,3
1P	50	0R - 100T	0,58	0,53	4,5	63,09	0,53	62,6
2P	170	0R - 100T	0,48	0,53	4,5	63,09	0,53	62,6

Tabla 22. Resumen de los resultados de las probetas de prueba con asfalto modificado CARIPHALTE tipo II

No	Giros	BRIQ.	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H _{MEDIA}	H _{INMEDIATO}
1P	50	100R - 0T	2,262	2255,21	0,53	7,0	65,25	64,70
2P	170	100R - 0T	2,335	2328,00	0,24	4,0	63,25	63,00
1P	50	75R - 25T	2,341	2333,98	0,30	4,0	63,50	63,20
2P	170	75R - 25T	2,411	2403,77	0,08	1,1	61,34	61,00
1P	50	50R - 50T	2,302	2295,09	0,70	6,4	64,44	64,00
2P	170	50R - 50T	2,401	2393,80	0,15	2,4	61,74	61,50
1P	50	25R - 75T	2,369	2361,89	0,27	3,5	62,74	62,40
2P	170	25R - 75T	2,421	2413,74	0,11	1,4	60,84	60,50
1P	50	0R - 100T	2,399	2391,80	0,17	1,9	62,18	61,80
2P	170	0R - 100T	2,434	2426,70	0,09	0,5	60,64	60,20
No	Giros	BRIQ.	H _{RECUP}	H _{REC.PROM}	% Va req	H _(mm)	H _{REC.PROM}	H _{DEFINITIVA(mm)}
1P	50	100R - 0T	0,55	0,40	4,7	63,7	0,4	63,3
2P	170	100R - 0T	0,25	0,40	4,7	63,7	0,4	63,3
1P	50	75R - 25T	0,30	0,31	4,8	64,12	0,31	63,8
2P	170	75R - 25T	0,33	0,31	4,8	64,12	0,31	63,8
1P	50	50R - 50T	0,43	0,33	4,9	63,44	0,33	63,1
2P	170	50R - 50T	0,23	0,33	4,9	63,44	0,33	63,1
1P	50	25R - 75T	0,34	0,34	4,8	63,87	0,34	63,5
2P	170	25R - 75T	0,34	0,34	4,8	63,87	0,34	63,5
1P	50	0R - 100T	0,38	0,41	4,7	65,16	0,41	64,8
2P	170	0R - 100T	0,44	0,41	4,7	65,16	0,41	64,8

4.3.3.2. Compactación de las briquetas definitivas (altura)

Las briquetas definitivas se compactan de la siguiente forma;

- Una vez puesta la mezcla en el molde e introducida al compactador, me dirijo a la pantalla digital de este y allí selecciono la modalidad de compactación, para este caso selecciono compactación por altura definida.
- Para cada tipo de mezcla se realizan dos compactaciones, estas con las alturas definidas por las briquetas de prueba para cada tipo de mezcla.
- Listas las probetas las identifico (1- 2) y ejecuto los ensayos dichos.

A continuación se ilustran un ejemplo del cálculo de % de vacíos llenos de aire para las briquetas definitivas (1 - 2) 50R-50T 80-100

TEMP	24,9
GMM	2,44
K	1,000025

No	H _{DEF} (mm)	% ASF	BRIQ. #	W seco	W sum	W sss	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va
1	62.7	5	50R-80/100	1150,4	662,5	1151,8	2,351	2344,12	0,29	4,8
2	62.7	5	50R-80/100	1149,6	661,8	1151,6	2,347	2340,10	0,41	4,9

ALTURA (mm)

ESPECIMEN N°	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	H _{MEDIA}
1	63,10	63,20	63,20	63,20	63,18
2	63,15	63,10	63,00	63,15	63,10

DIAMETRO (mm)

ESPECIMEN N°	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D ₆	D _{MEDIA}
1	100,05	100,05	100,00	100,05	100,10	100,05	100,1
2	100,20	100,20	100,25	100,15	100,20	100,20	100,20

Tabla 23. Resumen de los resultados de las probetas definitivas con asfalto convencional 60-70

No	H _{DEF(mm)}	BRIQ.	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H _{MEDIA}	D _{MEDIA}
1	63,2	100R - 0T	2,317	2310,49	0,14	5,1	63,58	100,33
2	63,2	100R - 0T	2,322	2314,71	0,24	4,9	63,49	100,28
1	62,8	75R - 25T	2,343	2336,31	0,31	4,4	63,20	100,32
2	62,8	75R - 25T	2,347	2339,80	0,33	4,2	63,05	100,23
1	62,0	50R - 50T	2,375	2368,12	0,25	4,1	62,35	100,28
2	62,0	50R - 50T	2,379	2371,84	0,19	4,0	62,34	100,21
1	62,7	25R - 75T	2,360	2353,40	0,49	5,0	62,94	100,15
2	62,7	25R - 75T	2,363	2356,14	0,39	4,9	62,96	100,14
1	61,8	0R - 100T	2,383	2376,09	0,17	4,0	62,09	100,12
2	61,8	0R - 100T	2,383	2376,05	0,29	4,0	62,13	100,16

Tabla 24. Resumen de los resultados de las probetas definitivas con asfalto convencional 80-100

No	H _{DEF(mm)}	BRIQ.	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H _{MEDIA}	D _{MEDIA}
1	62,3	100R - 0T	2,324	2317,31	0,32	4,7	63,66	100,11
2	62,3	100R - 0T	2,333	2325,78	0,12	4,4	63,13	100,18
1	62,6	75R - 25T	2,344	2337,38	0,20	5,1	63,10	100,11
2	62,6	75R - 25T	2,345	2337,63	0,37	5,1	63,09	100,15
1	62,7	50R - 50T	2,351	2344,12	0,29	4,8	63,18	100,05
2	62,7	50R - 50T	2,347	2340,10	0,41	4,9	63,10	100,20
1	62,3	25R - 75T	2,356	2348,93	0,41	4,8	63,00	100,08
2	62,3	25R - 75T	2,355	2348,25	0,29	4,8	62,81	100,13
1	62,6	0R - 100T	2,364	2357,26	0,29	4,5	62,90	100,10
2	62,6	0R - 100T	2,352	2345,18	0,37	5,0	62,85	100,16

Tabla 25. Resumen de los resultados de las probetas definitivas con asfalto modificado CARIPHALTE tipo II

No	H _{DEF(mm)}	BRIQ.	G _{bulk}	Densidad	absorción	%Va	H _{MEDIA}	D _{MEDIA}
1	62,3	100R - 0T	2,312	2305,36	0,18	5,0	63,85	100,19
2	62,3	100R - 0T	2,296	2289,13	0,16	5,6	63,88	100,19
1	62,6	75R - 25T	2,309	2302,34	0,16	5,3	64,15	100,11
2	62,6	75R - 25T	2,303	2296,58	0,26	5,5	64,15	100,14
1	62,7	50R - 50T	2,337	2329,80	0,32	5,0	63,38	100,09
2	62,7	50R - 50T	2,336	2328,52	0,22	5,0	63,45	100,07
1	62,3	25R - 75T	2,340	2333,30	0,33	4,7	63,50	100,21
2	62,3	25R - 75T	2,341	2333,58	0,53	4,7	63,55	100,23
1	62,6	0R - 100T	2,309	2301,63	0,70	5,6	64,44	100,13
2	62,6	0R - 100T	2,316	2308,73	0,73	5,3	64,14	100,10

4.4. CALCULO DE LA RESISTENCIA A LA DEFORMACION PERMANENTE (BS – 226)

Una vez listas las probetas de los 3 tipos de asfalto, y las 5 combinaciones de arenas en la mezcla, y conociendo todas sus características las cuales están dentro del rango de una mezcla densa en caliente MDC-2 se dispone a ensayarlas y calcular la resistencia a la deformación permanente. Para esto se debe introducir dentro de la cámara de temperatura controlada durante un mínimo de 4 horas cada probeta.

Las condiciones normales del ensayo son:

- Temperatura de ensayo = 40°C,
- Carga de ensayo = 100 kPa,
- Carga de acondicionamiento = 10% de la carga de ensayo = 10 kPa,
- Número de ciclos de carga = 3600,
- Número de ciclos de reposo = 900 al finalizar los 3600 ciclos de carga.

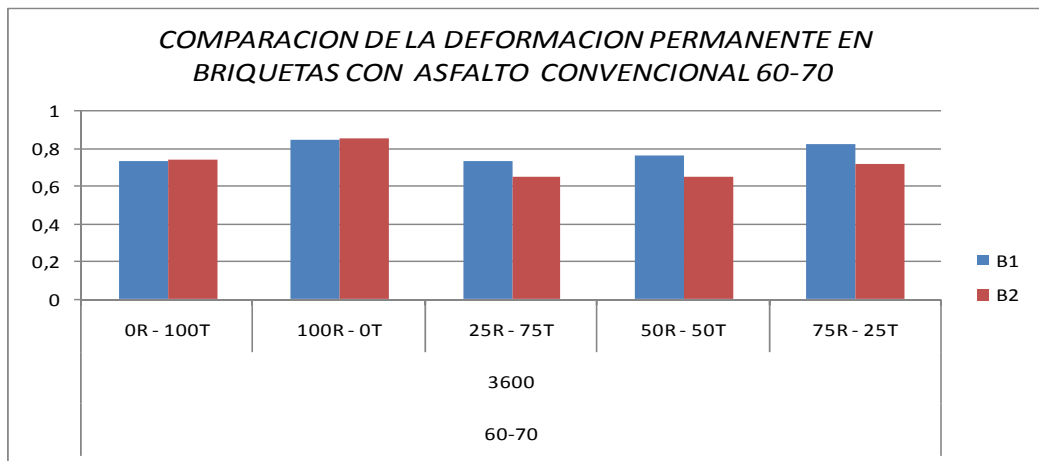
La aplicación de la carga consiste en 3600 ciclos, en donde cada ciclo consta de 1 segundo de carga y 1 segundo de reposo; por lo que el ensayo de deformación permanente dura 2 horas para cada briqueta.

A continuación se presentan las graficas de deformación permanente en escala logarítmica como lo pide la normatividad del ensayo.

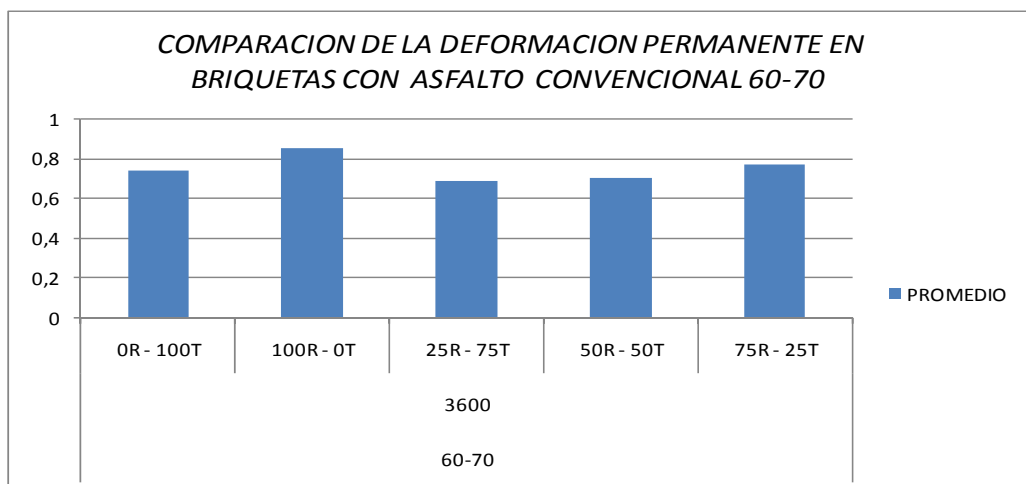
ANEXO A. GRAFICAS Y TABLAS DE RESULTADOS.

5. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis se implementó para los datos obtenidos el equipo de ensayo (N.A.T.) de resistencia a la deformación permanente; Este equipo proporciona parejas de datos de este modo, para cada pulso de aplicación de carga me general un porcentaje de deformación axial, encontrando de esta forma en el pulso 3600 el porcentaje de deformación axial total de la briqueta.



Gráfica 10. Deformación permanente probetas con asfalto convencional 60-70

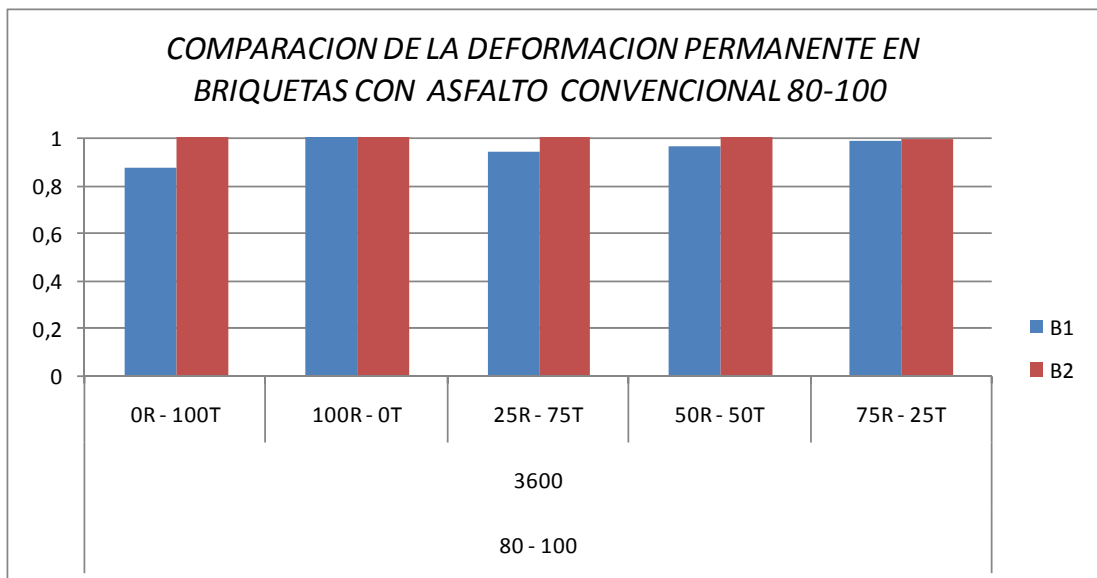


Gráfica 11. Deformación permanente probeta promedio con asfalto convencional 60-70

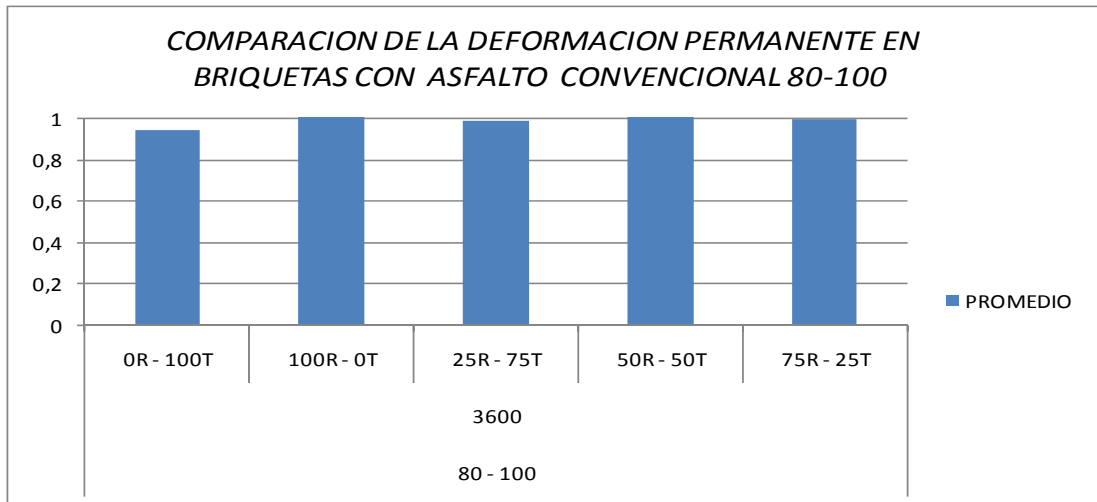
Las gráficas 10 y 11 muestran como varía la deformación según el porcentaje de arenas de río y trituración de las mezclas con asfalto convencional 60-70. Con estos valores observados en la grafica y teniendo en cuenta la norma BS-226 se puede analizar que en general estas mezclas con asfalto convencional 60-70 tienen excelente resistencia a la deformación permanente ya que el porcentaje de deformación axial en general es menor al 0.8%, (no susceptibles al ahuellamiento <1%).

Analizando y comparando cada una de estas mezclas se analiza que las mezclas que contiene 0% de arenas de rio y 100% de arenas de trituración (0R–100T) y las de 25% de arenas de rio y 75% de trituración (25R–75T) presentan los menores porcentajes de deformación axial, y además estos porcentajes de arenas están dentro de los limites especificados en la norma INVIAS-07.

Por otra parte se observa que la mezcla asfáltica que contiene el 100% de arenas de río (100R-0T), presentan el mayor porcentaje de deformación axial.



Gráfica 12. Deformación permanente probetas con asfalto convencional 80-100

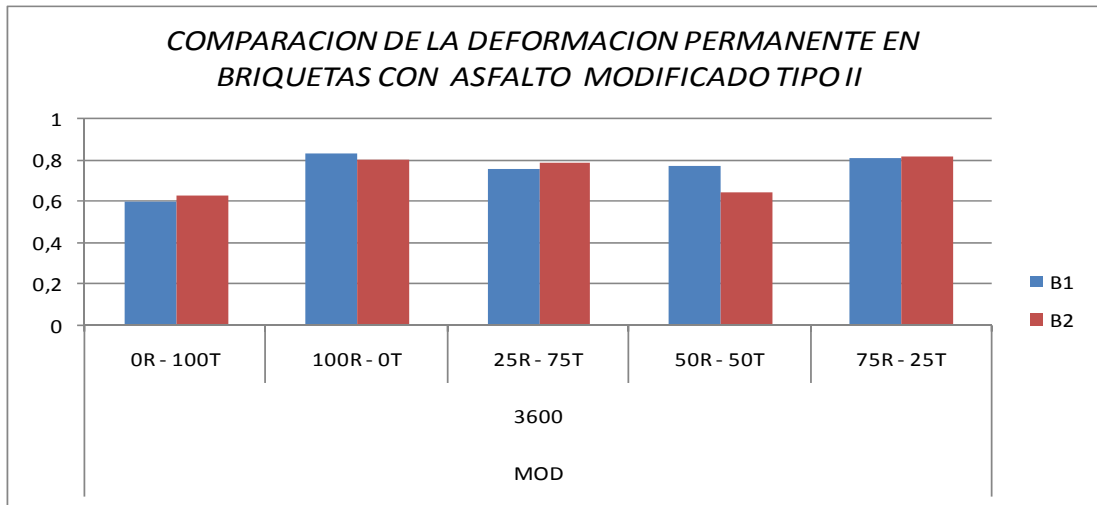


Gráfica 13. Deformación permanente probeta promedio con asfalto convencional 80-100

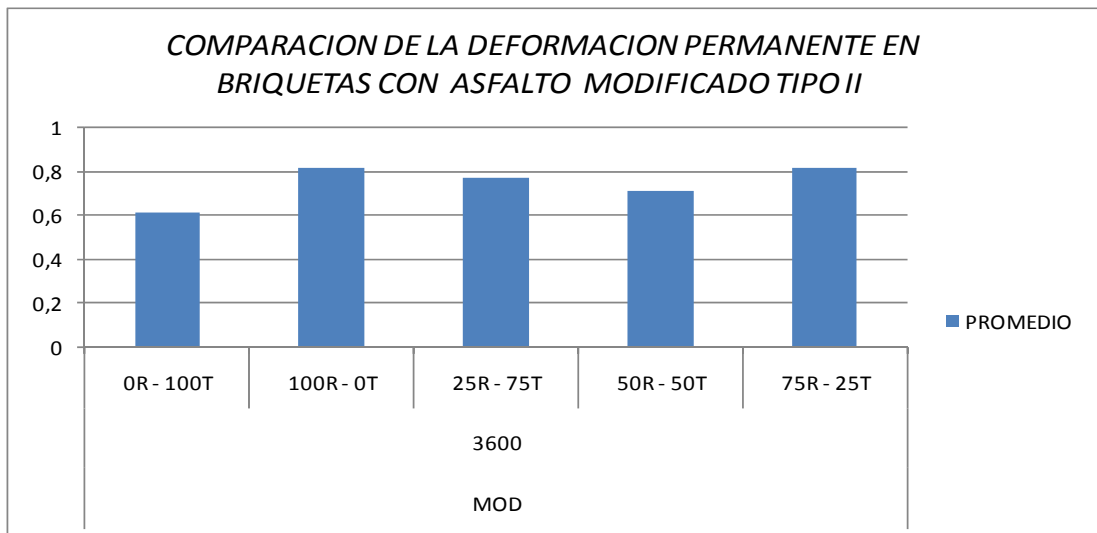
Las gráficas 12 y 13 muestran como varía la deformación según el porcentaje de arenas de río y trituración de las mezclas con asfalto convencional 80-100. Con estos valores observados en la grafica y teniendo en cuenta la norma BS-226 se puede analizar que en general estas mezclas con asfalto convencional 80-100 se encuentran en el limite del rango posiblemente ahullable, ya que su porcentaje de deformación axial en general está por los limites de 1. (Probablemente susceptibles al ahuellamiento 1%-2%).

Analizando más a fondo y comparando cada una de estas mezclas se analiza que las mezclas que contiene 0% de arenas de rio y 100% de arenas de trituración (0R–100T) presentan los menores porcentajes de deformación axial (0.95%), y las demás mezclas con este tipo de asfalto presentan mayor porcentaje de deformación axial que la anteriormente mencionada (entre 1% - 1.05%).

Por otra parte se observa que la mezcla asfáltica que contiene el 100% de arenas de río (100R-0T), presentan el mayor porcentaje de deformación axial.



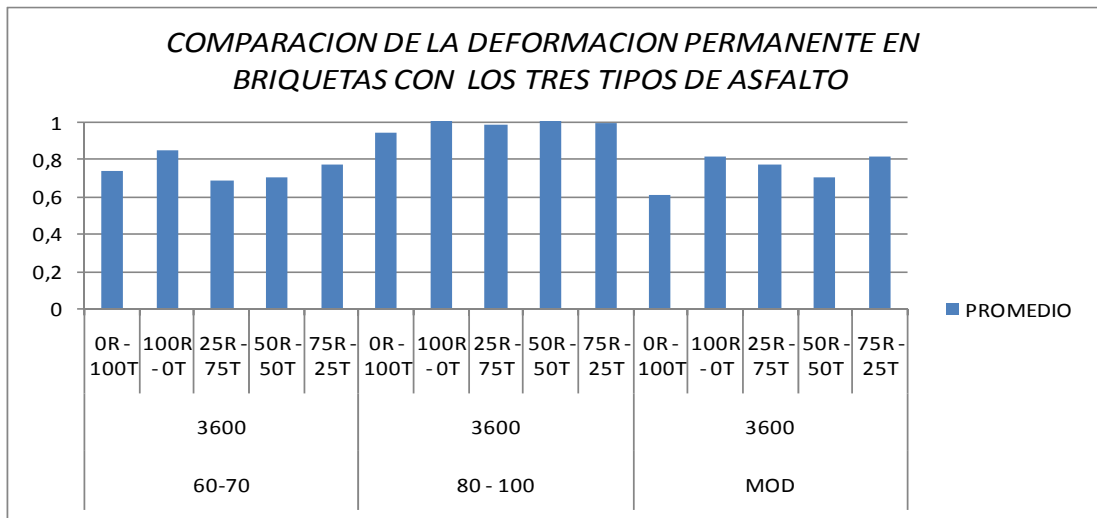
Gráfica 14. Deformación permanente probetas con asfalto modificado tipo II



Gráfica 15. Deformación permanente probeta promedio con asfalto modificado tipo II

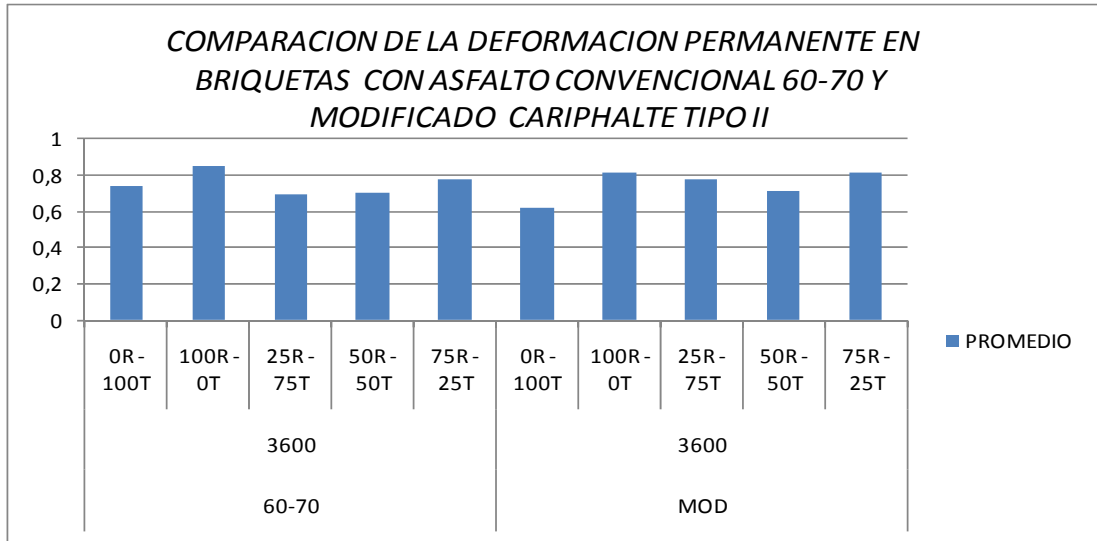
Las gráficas 14 y 15 muestran como varía la deformación según el porcentaje de arenas de río y trituración de las mezclas con asfalto modificado cariphalte tipo II. Con estos valores observados en la gráfica y teniendo en cuenta la norma BS-226 se puede analizar que en general estas mezclas con asfalto modificado cariphalte tipo II tienen excelente resistencia a la deformación permanente ya que el porcentaje de deformación axial en general es \leq al 0.8%, (no susceptibles al ahuellamiento $<1\%$).

Analizando más a fondo y comparando cada una de estas mezclas se analiza que las mezclas que contienen un porcentaje de arenas de río $\leq 50\%$ (0R-100T; 25R-75T; 50R-50T) presentan los menores % de deformación axial, Por otra parte se observa que la mezcla asfáltica que contiene el 100% Y 75% de arenas de río (100R-0T; 75R-25T)), presentan el mayor % de deformación axial.



Gráfica 16. Deformación permanente en las probetas con los tres tipos de asfaltos

En la grafica 16 se observan los porcentajes de deformación axial para los tres tipos de asfaltos, y en base a esto se analiza que en las mezclas con asfalto convencional 80-100 se presentan las mayores deformaciones axiales. Y en las mezclas con asfalto convencional 60-70 y asfalto modificado cariphalte tipo II los porcentajes de deformación axial tienden a ser menores y aceptables ya que son < al 1%.



Gráfica 17. Deformación permanente en las probetas con asfalto convencional 60-70 y asfalto modificado cariphalte tipo II.

En la grafica 17 se observan los porcentajes de deformación axial para las mezclas con asfalto convencional 60-70 y asfalto modificado cariphalte tipo II, analizando los resultados se encuentra que tienen un comportamiento similar en cuanto a su deformación.

6. CONCLUSIONES

- En las mezclas elaboradas con el asfalto convencional 60-70 se presenta una buena resistencia a la deformación axial en general, ya que el porcentaje de deformación axial es menor al 0.8% y según la BS-226 las mezclas elaboradas con este tipo de asfalto no son susceptibles al ahuellamiento.
- En las mezclas elaboradas con el asfalto convencional 80-100 se presenta una deformación axial del 1% en general y de acuerdo a esto las mezclas elaboradas con este asfalto son posiblemente susceptibles al ahuellamiento.
- En las mezclas elaboradas con el asfalto modificado cariphalte tipo II se presenta una buena resistencia a la deformación axial en general, ya que el porcentaje de deformación es menor al 0.8% y de acuerdo a esto la mezclas elaboradas con este asfalto no son susceptibles al ahuellamiento.
- Los porcentajes de arenas de río y trituración que contenga la mezcla asfáltica influyen directamente en la deformación permanente de esta.
- La procedencia, forma y textura de los agregados finos que componen la mezcla asfáltica influye directamente en la resistencia a la deformación permanente de esta.
- Las mezclas diseñadas con el 100% de arenas de trituración (0R-100T) presentan una mayor resistencia a la deformación permanente que las demás combinaciones de arenas en general.

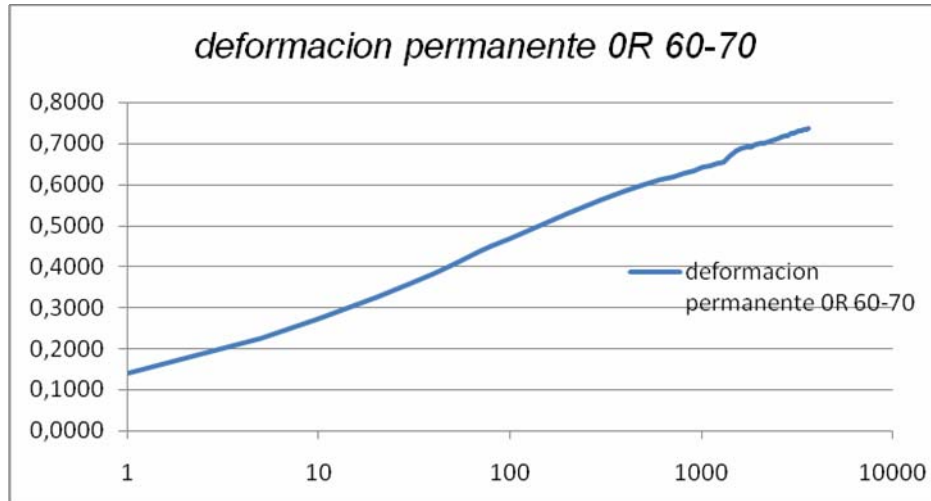
- Las mezclas que contienen un 25% de arenas de río (25R-75T) presentan una buena resistencia a la deformación permanente en comparación con demás mezclas.
- los asfaltos más blandos utilizados en la preparación de mezclas asfálticas producen mezclas más susceptibles al ahullamiento.
- En cuanto a las mezclas preparadas con asfalto convencional 60-70 y el asfalto modificado se observa que tienen un comportamiento similar en resistencia a deformación permanente.
- La realización de la presente proyecto investigativo, trajo consigo un amplio crecimiento personal y profesional al permitir el contacto directo y la vinculación a un medio competitivo con altos estándares de calidad en mezclas asfálticas.
- La participación en este proyecto de investigación de amplia envergadura, permitió la adquisición de habilidades y destrezas en temas de avanzada como la resistencia a la deformación permanente en las mezclas asfálticas densas en caliente.

7. RECOMENDACIONES

- Según los resultados en las deformaciones permanentes con los tres diferentes asfaltos en la preparación de las mezclas asfálticas densas en caliente, se recomienda la utilización del asfalto modificado cariphaltho tipo II, debido a que presentó los mismos porcentajes de deformación axial más bajos cuando las arenas tienen un 100% de trituración.
- Hacer un ensayo similar a este aumentando las temperaturas asimilando nuevas características de campo, y medir los comportamientos de las mezclas con estas nuevas condiciones para los tres tipos de asfaltos.

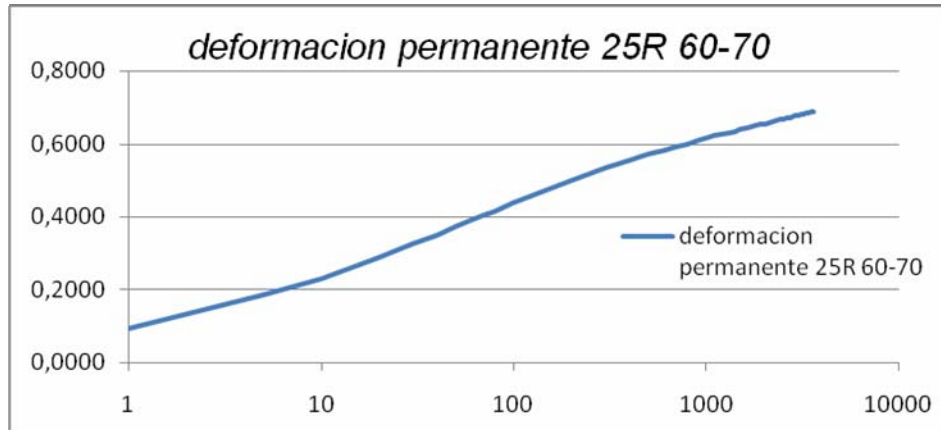
8. ANEXOS

ANEXO A. GRAFICAS Y TABLAS DE RESULTADOS



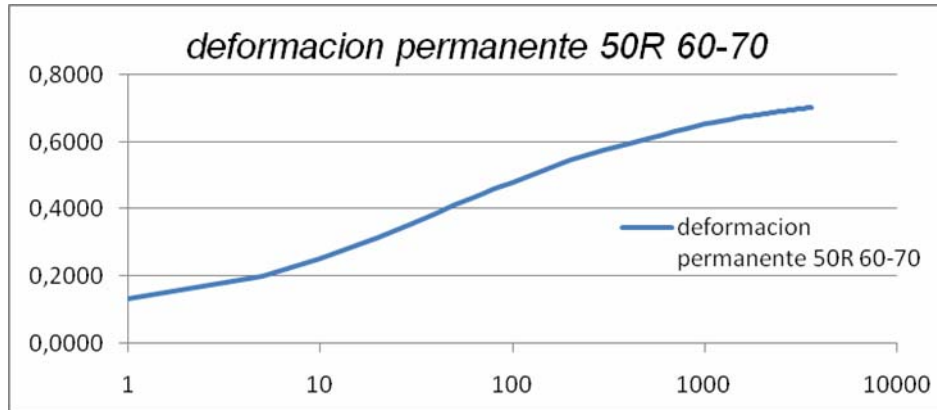
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
60-70	0R - 100T	5	0,2243
		10	0,2743
		100	0,4693
		1000	0,6406
		1400	0,66895
		1800	0,69205
		3600	0,73645

Gráfica 18. Deformación permanente probeta promedio 0R 60-70



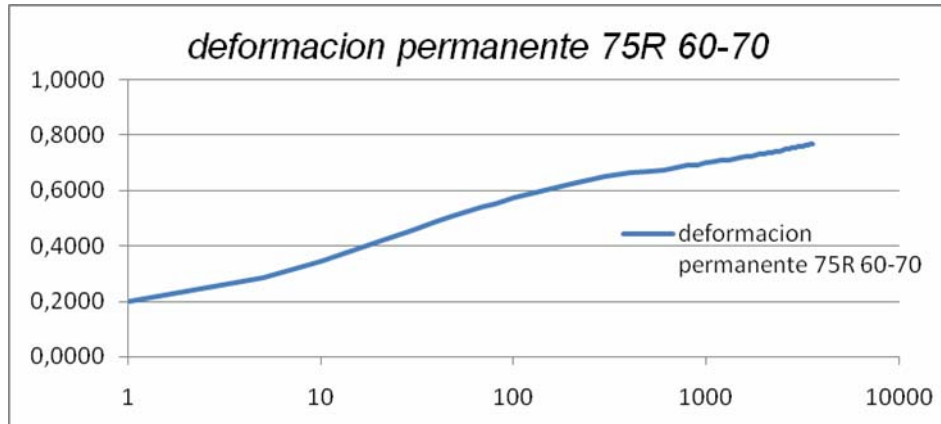
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
60-70	25R - 75T	5	0,1835
		10	0,22945
		100	0,4358
		1000	0,6128
		1400	0,63115
		1800	0,6482
		3600	0,68575

Gráfica 19. Deformación permanente probeta promedio 25R 60-70



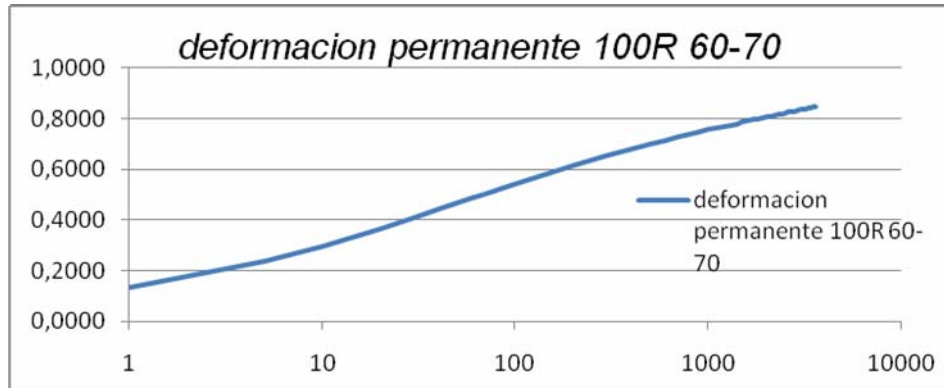
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
60-70	50R - 50T	5	0,19885
		10	0,25125
		100	0,4794
		1000	0,65125
		1400	0,66855
		1800	0,67825
		3600	0,70155

Gráfica 20. Deformación permanente probeta promedio 50R 60-70



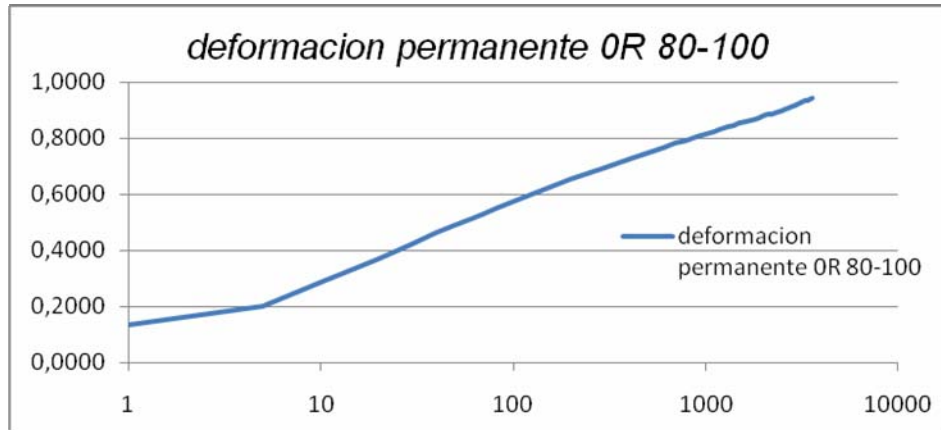
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
60-70	75R - 25T	5	0,2826
		10	0,34445
		100	0,5713
		1000	0,69735
		1400	0,7137
		1800	0,7271
		3600	0,76665

Gráfica 21. Deformación permanente probeta promedio 75R 60-70



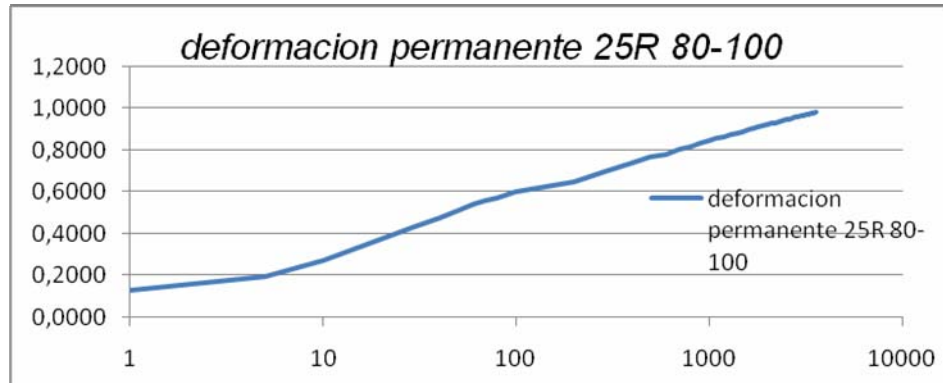
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
60-70	100R - 0T	5	0,23725
		10	0,29485
		100	0,5423
		1000	0,7549
		1400	0,7793
		1800	0,79845
		3600	0,8459

Gráfica 22. Deformación permanente probeta promedio 100R 60-70



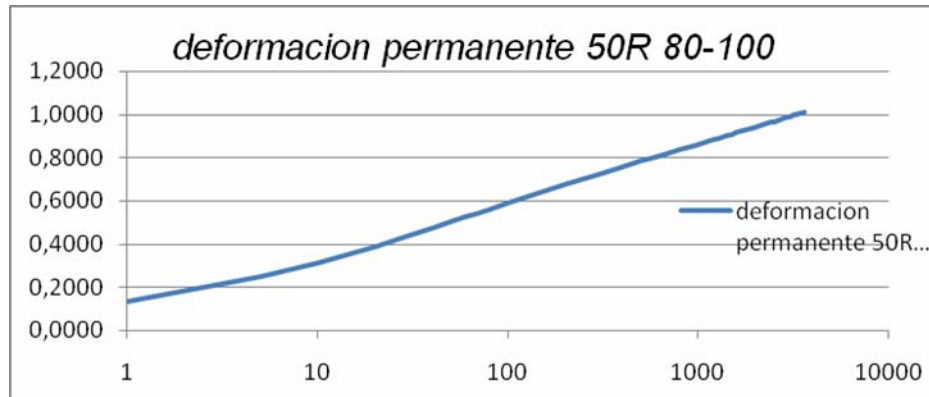
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
80 - 100	OR - 100T	5	0,2015
		10	0,284
		100	0,5729
		1000	0,81555
		1400	0,84605
		1800	0,8694
		3600	0,94385

Gráfica 23. Deformación permanente probeta promedio OR 80-100



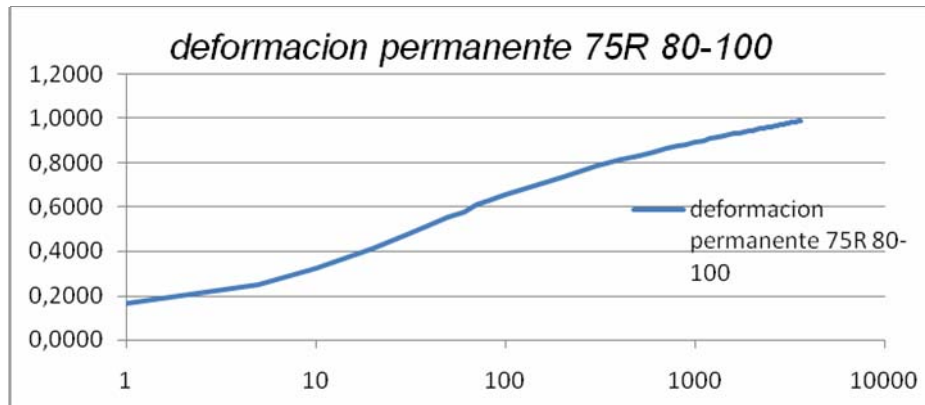
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
80 - 100	25R - 75T	5	0,19625
		10	0,2702
		100	0,59925
		1000	0,8459
		1400	0,883
		1800	0,9113
		3600	0,98405

Gráfica 24. Deformación permanente probeta promedio 25R 80-100



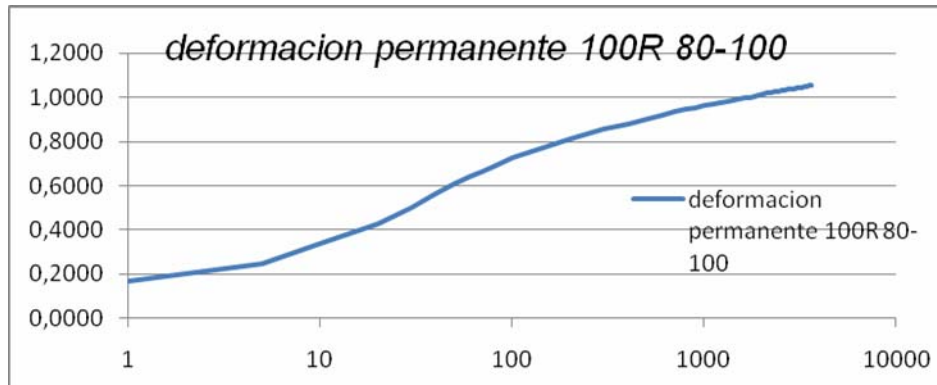
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
80 - 100	50R - 50T	5	0,2517
		10	0,31185
		100	0,5917
		1000	0,86315
		1400	0,90065
		1800	0,92955
		3600	1,0106

Gráfica 25. Deformación permanente probeta promedio 50R 80-100



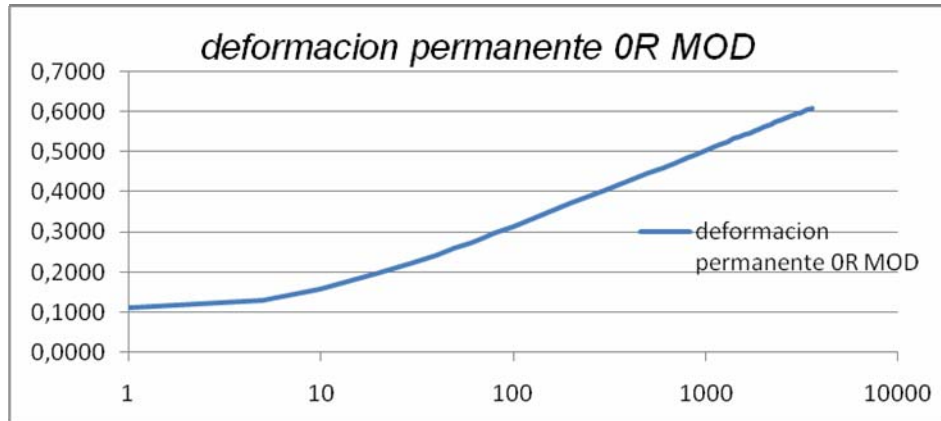
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
80 - 100	75R - 25T	5	0,2457
		10	0,3224
		100	0,65465
		1000	0,89475
		1400	0,9214
		1800	0,94145
		3600	0,99185

Gráfica 26. Deformación permanente probeta promedio 75R 80-100



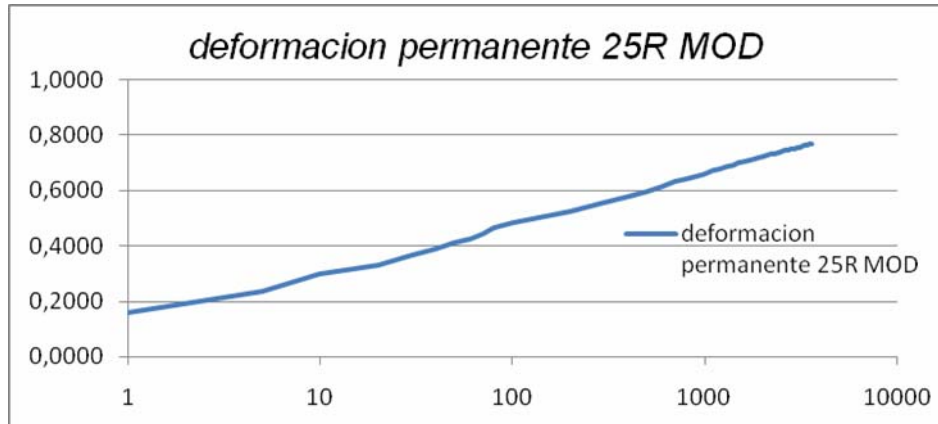
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
80 - 100	100R - 0T	5	0,25005
		10	0,33645
		100	0,72365
		1000	0,96195
		1400	0,98725
		1800	1,0051
		3600	1,05305

Gráfica 27. Deformación permanente probeta promedio 100R 80-100



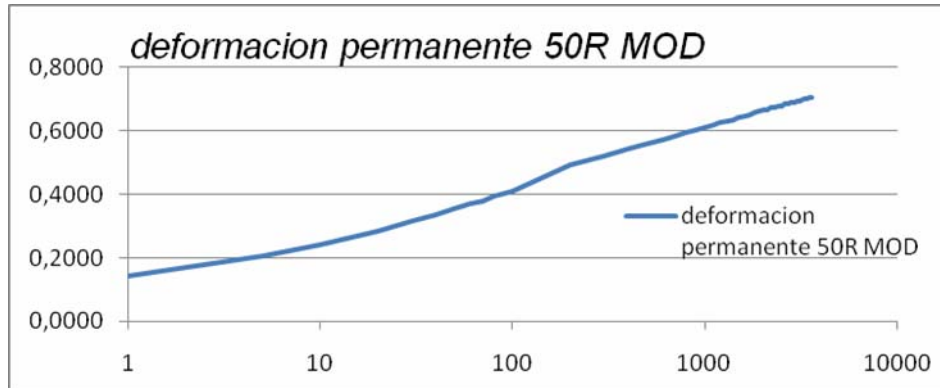
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
MOD	0R - 100T	5	0,1287
		10	0,1564
		100	0,3138
		1000	0,5041
		1400	0,5341
		1800	0,5536
		3600	0,6106

Gráfica 28. Deformación permanente probeta promedio 0R mod. Tipo II



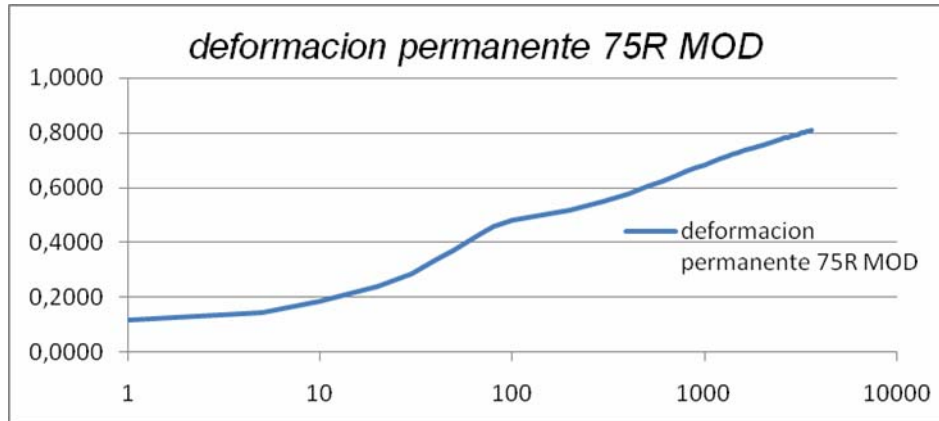
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
MOD	25R - 75T	5	0,2342
		10	0,29645
		100	0,48335
		1000	0,66115
		1400	0,692
		1800	0,71375
		3600	0,76735

Gráfica 29. Deformación permanente probeta promedio 25R mod. Tipo II



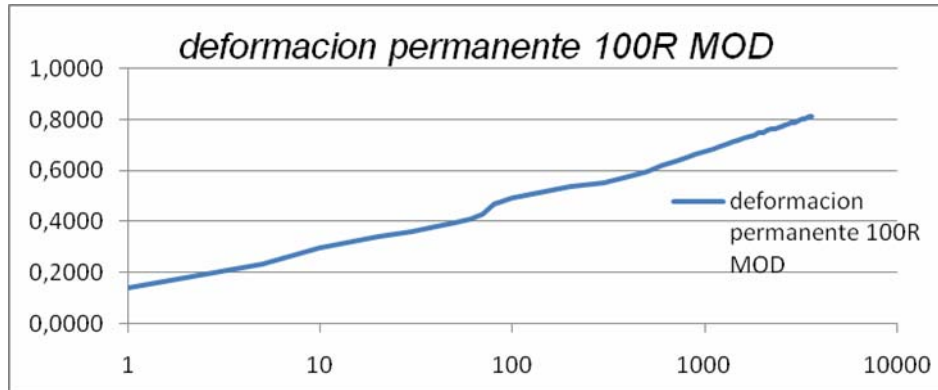
Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
MOD	50R - 50T	5	0,20625
		10	0,2399
		100	0,411
		1000	0,61045
		1400	0,63425
		1800	0,6549
		3600	0,7033

Gráfica 30. Deformación permanente probeta promedio 50R mod. Tipo II



Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
MOD	75R - 25T	5	0,1469
		10	0,1868
		100	0,48365
		1000	0,68365
		1400	0,72085
		1800	0,74555
		3600	0,80955

Gráfica 31. Deformación permanente probeta promedio 75R mod. Tipo II



Máx de Ax strain, %			BRIQUETA #
TIPO ASFALTO	% ARENAS	PULSO #	PROMEDIO
MOD	100R - 0T	5	0,2339
		10	0,3007
		100	0,4958
		1000	0,6747
		1400	0,7137
		1800	0,74
		3600	0,8119

Gráfica 32. Deformación permanente probeta promedio 100R mod. Tipo II

BIBLIOGRAFÍA

- CHIMAN A., SANABRIA L., HERNÁNDEZ L., CHIMAN L. Evaluación de las Propiedades de Asfaltos Modificados con Polímeros Activados. Corporación para la Investigación y Desarrollo en Asfaltos en el Sector de Transporte e Industrial - CORASFALTOS.
- CORASFALTOS. Desarrollo de una metodología para la evaluación de asfaltos para pavimentos. Piedecuesta, Santander. 2005.
- CORASFALTOS – ICP. Estado del arte tecnológico del sector responsable de la construcción y conservación de pavimentos flexibles. “Fabricación, colocación, compactación y tendencias nacionales e internacionales de mezclas asfálticas”. Piedecuesta, abril de 2005.
- MORALES, Pedro; RODRIGUEZ SALAH, Luz Ángela y PAREJA URIBE, Carlos Alberto. Fundamentos teóricos de las interacciones químicas entre el asfalto y el agregado mineral. Monografía Universidad Industrial de Santander.
- National Asphalt Pavement Association – NAPA, and National Center for Asphalt Technology – NCAT. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. Second Edition, 1996.
- SHELL BITUMEN. Asfaltos Modificados. Memorias de conferencia.
- VILLAMIZAR LEAL, Sandra y LONDOÑO CALA, Jairo Alberto. Evaluación de la caracterización de agregados para capas de pavimentos. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander. 1997.

INFOGRAFÍA

- www.monografias.com
TONDA, Mauricio. Asfaltos Modificados con Polímeros.
- www.catarina.udlap.mx
Capitulo 5, deformaciones permanentes.pdf
- www.imt.mx
Publicación Técnica de agregados pétreos
- www.upcommons.upc.edu
Deformaciones permanentes.pdf
- www.monografias.com
trabajos13.pafle.shtml
- www.cedex.es
Equipos de Ensayo en Laboratorio.
- www.invias.gov.co
Estado de la red vial por observación visual a junio de 2004.
- www.eclac.cl/estadisticas/
- www.mop.go.sv
Incidencia de los agregados en el comportamiento de las mezclas asfálticas.pdf