

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Código F-AC-DBL-007	Fecha 10-04-2012	Revisión A
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO		Pág. i(114)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTOR	INGRID JOHANNA ESPEJO CAPELLA		
FACULTAD	INGENIERIAS		
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL		
DIRECTOR	FRANCISCO ALFONSO DURAN CASTRO		
TITULO DE LA TESIS	MEZCLAS ASFALTICAS POROSAS UTILIZADAS EN LA PAVIMENTACION DE VIAS PARA EL MANEJO DE AGUAS DE ESCORRENTIA		
RESUMEN(70 palabras aproximadamente)			
<p>MONOGRAFIA DE COMPILACION REFERENTE A LAS MEZCLAS ASFALTICAS POROSAS UTILIZADAS EN LA PAVIMENTACION DE VIAS PARA EL MANEJO DE AGUAS DE ESCORRENTIA, DONDE SE PRESENTAN LAS CARACTERISTICAS, PROPIEDADES, DISEÑO, NORMATIVA Y APLICACIONES EXISTENTES DE ESTE TIPO DE MEZCLAS.</p> <p>EL DESARROLLO DE ESTA MONOGRAFIA PERMITE LA DIFUSION DE UNA ALTERNATIVA DE PAVIMENTACION UTILIZADA DESDE HACE VARIAS DECADAS EN MUCHOS PAISES, Y QUE HA PERMITIDO LA MITIGACION DEL IMPACTO OCASIONADO POR LAS INUNDACIONES Y PROBLEMAS PROPIOS DEL DESARROLLO URBANO.</p>			
CARACTERISTICAS			
PAGINAS: 111	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1



MEZCLAS ASFÁLTICAS POROSAS UTILIZADAS EN LA PAVIMENTACIÓN DE VÍAS
PARA EL MANEJO DE AGUAS DE ESCORRENTÍA

Autor

INGRID JOHANNA ESPEJO CAPELLA

Trabajo de grado modalidad monografía para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Esp. FRANCISCO ALFONSO DURÁN CASTRO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Nota

El Comité Curricular del Plan de Estudios de Ingeniería Civil, según consta en el Acta No. 0001 de fecha 27 de enero de 2020, acordó asignar como jurados de la presente monografía a los docentes **Katerine Carreño García** y **María Fernanda Camargo**.

Agradecimientos

La autora de esta monografía expresa su cordial agradecimiento al especialista Francisco Alfonso Durán Castro, por la dirección del trabajo, su apoyo y colaboración permanente durante toda la investigación.

Así mismo agradece a todas aquellas personas involucradas en la realización de su trabajo: amigos, compañeros y docentes, así como aquellos profesionales que brindaron ayuda.

Finalmente agradece a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por brindar los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo.

Ingrid Johanna Espejo Capella

Tabla de contenido

Introducción.....	xiii
Capítulo 1. Describir las características de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas porosas	1
1.1 Material bituminoso.....	4
1.2 Agregados pétreos	11
1.2.1 Agregado grueso.....	11
1.2.2 Agregado fino.....	13
1.3 Llenante mineral.....	15
1.4 Franjas granulométricas.....	17
1.5 Aditivos mejoradores de adherencia entre los agregados y el asfalto	21
Capítulo 2. Identificar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas	22
2.1 Diseño de mezclas asfálticas porosas	22
2.2 Propiedades de las mezclas asfálticas porosas	25
2.2.1 Resistencia al desgaste.	25
2.2.2 Contenido de vacíos con aire.....	26
2.2.3 Permeabilidad.....	28
2.2.4 Adhesividad.....	30
2.2.5 Propiedades adicionales.....	30
2.3 Aspectos a verificar para garantizar la calidad de mezclas asfálticas porosas en el pavimento.....	31
2.3.1 Compactación.....	31
2.3.2 Espesor.....	32
2.3.3 Planicidad o lisura.....	32
2.3.4 Textura.....	33
2.3.5 Resistencia al deslizamiento.....	34
2.3.6 Regularidad superficial (rugosidad).....	35

2.3.7 Segregación térmica.	36
2.4 Estudios sobre las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas	36
 Capítulo 3. Conocer las normativas nacionales e internacionales actuales para el uso de las mezclas asfálticas porosas.....	41
3.1 Normas de Colombia, España y México sobre el uso de mezclas asfálticas porosas	42
3.1.1 Material bituminoso.....	43
3.1.2 Contenido de vacíos con aire.....	44
3.1.3 Agregado pétreo.	45
3.1.4 Llenante mineral.....	49
3.1.5 Granulometría.....	50
 Capítulo 4. Detallar el procedimiento de diseño y construcción de pavimentos con mezclas asfálticas porosas	53
4.1 Procedimiento de diseño de un pavimento poroso	53
4.1.1 Diseño hidrológico e hidráulico.	54
4.1.2 Diseño estructural.....	57
4.2 Procedimiento de construcción de un pavimento poroso.....	60
4.3 Mantenimiento de pavimentos porosos.....	63
4.4 Ejemplos de estructura de pavimentos porosos.....	64
 Capítulo 5. Describir los procesos implementados para el manejo de aguas de escorrentía con pavimentos porosos.....	68
5.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS.....	71
5.1.1 Trincheras.....	72
5.1.2 Franjas de pasto.....	72
5.1.3 Canales vegetados.....	73
5.1.4 Jardines de bio retención.....	74
5.1.5 Estanques de infiltración.....	74
5.1.6 Estanques de detención.....	75
5.2 Implicaciones del uso de pavimentos porosos.....	76

5.2.1 Ventajas.....	76
5.2.2 Desventajas.....	77

Capítulo 6. Analizar las experiencias de la implementación de mezclas asfálticas porosas en Colombia y en otros países	79
6.1 Aplicaciones de mezclas asfálticas porosas en Colombia.....	79
6.2 Aplicaciones de mezclas asfálticas porosas en el mundo.....	81
Conclusiones.....	85
Referencias	89
Apéndices	93

Lista de figuras

Figura 1. Material bituminoso	5
Figura 2. Agregado grueso.....	12
Figura 3. Agregado fino o arena	14
Figura 4. Franja granulométrica para mezclas asfálticas porosas o drenantes	19
Figura 5. Franjas granulométricas investigaciones colombianas.....	20
Figura 6. Franjas granulométricas investigaciones hechas en otro países	20
Figura 7. Probetas tipo Marshall	24
Figura 8. Martillo mecánico de compactación Marshall	25
Figura 9. Permeabilidad de la mezcla asfáltica porosa o drenante.....	29
Figura 10. Compactador neumático	32
Figura 11. Regla rodante.....	33
Figura 12. Ensayo con el péndulo británico.....	34
Figura 13. Fotografía infrarroja	36
Figura 14. Requerimientos granulométricos de las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.....	51
Figura 15. Sistema A para la gestión del agua.....	55
Figura 16. Sistema B para la gestión del agua	56
Figura 17. Sistema C para la gestión del agua	56
Figura 18. Estructura pavimento poroso recomendada por CIRIA	65
Figura 19. Estructura de pavimento poroso recomendada por la Asociación de Pavimento de Asfalto de Arkansas	66
Figura 20. Estructura de pavimento poroso construida en el tramo experimental ubicado en la ruta Temuco-Cholchol, en Chile	66
Figura 21. Estructura de pavimento poroso recomendado por la NAPA	67
Figura 22. Representación del fenómeno de hidropilaje	68
Figura 23. Trinchera.....	72
Figura 24. Uso conjunto de trincheras y franjas de pasto	73
Figura 25. Canales vegetados	73
Figura 26. Jardines de bio retención	74
Figura 27. Estanque de infiltración.....	75
Figura 28. Estanque de detención o retención	75
Figura 29. Pavimento poroso en la ciudad de Soslayo, Chiapas, México	82
Figura 30. Pavimento poroso en la planta Schnyder Electric en Tlaxcala, México	82
Figura 31. Pavimento poroso en el hotel Intercontinental de Zapopan en Jalisco, México	83
Figura 32. Estacionamiento en Ontario, Canadá	84

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de la mezcla asfáltica según la temperatura	2
Tabla 2. Clasificación de la mezcla asfáltica según el porcentaje de vacíos con aire	3
Tabla 3. Material bituminoso a emplear de acuerdo al tipo de mezcla asfáltica	6
Tabla 4. Características exigidas para el material bituminoso.....	8
Tabla 5. Porcentaje óptimo de asfalto.....	10
Tabla 6. Características que debe cumplir el agregado grueso en las mezclas asfálticas.....	13
Tabla 7. Características que debe cumplir el agregado fino en las mezclas asfálticas	15
Tabla 8. Características que debe cumplir el llenante mineral en las mezclas asfálticas	16
Tabla 9. Requisitos granulométricos de la combinación de los agregados pétreo con el llenante mineral en mezclas asfálticas.....	18
Tabla 10. Temperatura de mezclas utilizada en algunas investigaciones.....	23
Tabla 11. Resistencia al desgaste (%).....	26
Tabla 12. Contenido de vacíos con aire calculado (%).....	28
Tabla 13. Resultados ensayo de permeabilidad (segundos).....	29
Tabla 14. Resultados de adhesividad o pérdida por desgaste en inmersión (%)	30
Tabla 15. Valores máximos admisible de IRI (m/km).....	35
Tabla 16. Material bituminoso aceptado en Colombia, España y México	44
Tabla 17. Contenido de vacíos con aire para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México	45
Tabla 18. Características del agregado grueso para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.....	46
Tabla 19. Características del agregado fino para mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.....	48
Tabla 20. Características del llenante mineral para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.....	49
Tabla 21. Requerimientos granulométricos de las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.....	50
Tabla 22. Franja granulométrica mezcla asfáltica porosa.....	97

Lista de apéndices

Apéndice A. Niveles de tránsito en Colombia.....	94
Apéndice B. Aspectos a considerar para el diseño de mezclas asfálticas porosas o drenantes. ...	96

Introducción

El desarrollo de la infraestructura vial juega un papel fundamental en la sociedad moderna, pues las vías permiten la interconexión entre ciudades y países, siendo un indicador del avance de un determinado país en materia social y económica. Sin embargo, la construcción de vías ha estado condicionada a criterios tradicionales como la resistencia, accesibilidad y eficiencia económica, dejando aún lado en la mayoría de los casos otros criterios de importancia como el agua, el suelo, la fauna, la flora, y la sociedad misma (Cárdenas, Albiter, & Jaimes, 2017).

En las últimas décadas se ha buscado la generación de nuevas alternativas para el desarrollo de vías, siendo las mezclas asfálticas porosas unas de las innovaciones más importantes al cumplir con las altas solicitudes del sector vial, pero, al mismo tiempo servir de ayuda hacia una gestión más controlada y eficiente de las aguas generadas por las precipitaciones, disminuyendo el impacto ambiental que tiende a generar el desarrollo de cualquier infraestructura vial (Cuervo, 2018).

El primer registro que se tiene sobre la construcción de un pavimento empleando mezclas asfálticas porosas data del año 1940 en los Estados Unidos y Reino Unido, donde se buscaba generar una superficie de mejor textura y a que a su vez lograra mitigar el efecto del hidropneumático originado por la acumulación de agua (Campos, 2008).

Después de Estados Unidos varios países siguieron desarrollando avances con el uso de este tipo de mezclas, por ejemplo, en el año 1968 en Francia se diseñaron pavimentos para comprobar sus ventajas, en la España de los años ochenta se creó la primera metodología de diseño y control de pavimentos porosos con la intervención de la Dirección General de

Carreteras y empresas privadas de la región. Progresivamente el diseño de estas mezclas fue difundiéndose rápidamente en toda Europa y en otros países, sin embargo, se mantuvo la preferencia de construir con mezcla asfáltica convencional, debido en gran parte por evitar los procesos de mantenimiento que requieren los pavimentos porosos, decisión que finalmente ha causado que muchas ciudades presenten grandes inundaciones debido a que la urbanización masiva disminuye la eficiencia de los sistemas de gestión del agua (Yalcinkaya, s.f.; Cuervo, 2018).

Por lo anterior fue necesario compilar de manera detallada los aspectos más importantes concernientes a las mezclas asfálticas porosas. El desarrollo de esta monografía de compilación tuvo como objetivo dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Son las mezclas asfálticas porosas una alternativa viable para el manejo de las aguas de escorrentía?

Para dar respuesta al anterior interrogante, fue necesario realizar una búsqueda y análisis de las investigaciones llevadas a cabo hasta la fecha con este tipo de mezclas. Las referencias fueron seleccionadas de trabajos de grado, artículos y publicaciones realizadas por universidades e instituciones reconocidas internacionalmente.

La elaboración de esta monografía tuvo una duración de dieciséis (16) semanas. El estudio de compilación fue efectuado en la ciudad de Ocaña, Norte de Santander, siendo una monografía de tipo descriptivo, ya que se realizó la recolección de información de referencias bibliográficas seleccionadas. Se llevó a cabo una técnica de investigación (metodología) de análisis de contenido, aplicando criterios objetivos durante el estudio, además de una síntesis de información (datos) por medio de herramientas estadísticas denominadas como meta-análisis.

La monografía está compuesta por 6 capítulos, en cada uno de los cuales se buscó cumplir con un objetivo específico que permitieran en conjunto dar respuesta a la pregunta planteada anteriormente. A continuación se presentan los capítulos desarrollados en este trabajo:

- Capítulo 1. Describir las características de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas porosas
- Capítulo 2. Identificar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas
- Capítulo 3. Conocer las normativas nacionales e internacionales actuales para el uso de las mezclas asfálticas porosas
- Capítulo 4. Detallar el procedimiento de diseño y construcción de pavimentos con mezclas asfálticas porosas
- Capítulo 5. Describir los procesos implementados para el manejo de aguas de escorrentía con pavimentos porosos
- Capítulo 6. Analizar las experiencias de la implementación de mezclas asfálticas porosas en Colombia y en otros países

Capítulo 1. Describir las características de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas porosas

Las mezclas asfálticas hacen referencia a la combinación de distintos materiales para conformar la carpeta de rodadura de un pavimento flexible. Entre los materiales usados se encuentran agregados minerales y pétreos que son aglomerados empleando materiales asfálticos, los cuales mediante un proceso de mezclado permiten que el agregado pétreo quede cubierto de una capa uniforme de asfalto (Garnica, 2005).

Dependiendo de las condiciones en las cuales se realice el proceso de mezclado, así como la proporción de los materiales y la finalidad que posea, las mezclas asfálticas pueden clasificarse en distintos tipos. Una de estas condiciones es la temperatura a la cual va hacer fabricada la mezcla, es así como se distinguen 4 tipos de mezclas: en frío, semi-templadas, tibias y en caliente. En la tabla 1 se muestra el rango que comprende cada tipo de mezcla y su propósito (Garnica, 2005; Arrieta, 2013).

Las mezclas en caliente son las consideradas como convencionales y suelen emplearse en la mayoría de proyectos de pavimentos de vías, sin embargo, representan una gran fuente de contaminación sobre todo por la alta producción de dióxido de carbono que se desprende en la fabricación de la mezcla (Arrieta, 2013).

Tabla 1

Clasificación de la mezcla asfáltica según la temperatura

Tipo de mezcla	Rango de temperatura	Próposito
Mezclas en frío	De 25°C a 60°C	Permitir la incorporación de materiales reciclados
Mezclas semi-templadas	De 60°C a 100°C	Disminuir las emisiones contaminantes y la energía requerida
Mezclas tibias	De 100°C a 135°C	Reducir requerimientos térmicos
Mezclas en caliente	De 135°C a 180°C	Producir mezcla asfáltica convencional

Nota: La clasificación está basada en la temperatura de producción. Senior Arrieta, 2013. *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación.*

Las mezclas en frío, semi-templadas y tibias, buscan disminuir la contaminación que genera una mezcla convencional en caliente, además, permiten el aprovechamiento de materiales reciclados como amidas grasas, polímeros, fibras, entre otros (Arrieta, 2013; Ayala & Juárez, 2010; Velasco, 2019).

Otras clasificaciones de las mezclas asfálticas dependen de las fracciones que utilizan de agregado pétreo, distinguiéndose el concreto asfáltico, macadam asfáltico, mortero asfáltico y el mastico asfáltico. De acuerdo a la granulometría, la mezcla puede ser continua y discontinua; continuas cuando presentan diferentes tamaños de agregado pétreo, y discontinuas cuando es limitado el número de tamaños en la mezcla. La última clasificación de la mezcla, y la más importante dentro de la presente investigación, depende del porcentaje de vacíos con aire. En Colombia, las mezclas asfálticas se clasifican según esta condición como se muestra en la tabla 2 (Garnica, 2005).

Tabla 2

Clasificación de la mezcla asfáltica según el porcentaje de vacíos con aire

Tipo de mezcla	Rango de porcentaje de vacíos con aire
Densas o cerradas	Menos del 6%
Semidensas o semicerradas	De 6% a 12%
Abiertas	De 12% a 18%
Porosas o drenantes	Más del 20%

Nota: Rango de porcentaje estimado. Garnica, et al., 2005. *Caracterización Geomecánica de mezclas asfálticas.*

Como se observa en la tabla 2, las mezclas asfálticas porosas son aquellas cuyo porcentaje de vacíos es superior al 20%, este es un criterio aceptado por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, quien además, estipula un porcentaje máximo de 25%. No obstante, instituciones de otros países como la Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto NAPA, por sus siglas en inglés, de Estados Unidos considera como mezclas porosas aquellas cuyo porcentaje de vacíos con aire sea mayor al 16%, en Canadá a partir del 15%, y en México porcentajes mayores al 18% (Castro M. , 2011).

La normativa del INVIAS permite el uso de mezclas asfálticas porosas o drenantes siempre y cuando cumplan los requisitos establecidos en el Artículo 453: Mezcla drenante, en la cual se indica que la mezcla debe ser preparada y colocada en caliente (Artículo 453 Invías, 2013).

Las mezclas asfálticas porosas o drenantes, según lo establecido por el INVIAS son permitidas para todos los niveles de tránsito establecidos por esta institución: NT1, NT2 y NT3. Sin embargo, en las descripciones del artículo 453: Mezcla drenante, se categorizan las propiedades de los materiales para los niveles de tránsito NT2 y NT3, pero, se indica que para

niveles de tránsito inferiores pueden utilizarse los requisitos de las NT2. Esto demuestra que la mezcla asfáltica porosa o drenante puede ser diseñada para satisfacer cualquier tipo de demanda vehicular. En el Apéndice A se describen las características de los niveles de tránsito establecidos por el INVIAS y por otras instituciones (Artículo 453 Invías, 2013).

En cuanto a los materiales, las mezclas asfálticas porosas se constituyen de los mismos materiales de una mezcla convencional: un material bituminoso (asfalto), agregados pétreos y llenante mineral, por lo que las diferencias sustanciales se encuentran en la distribución de estos materiales en la mezcla final (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

A continuación, se detallan las características principales de cada uno de los materiales constituyentes de esta mezcla de acuerdo a lo indicado por el Instituto Nacional de Vías, además, se comparan con otro tipo de mezclas aceptadas por esta institución, específicamente la mezcla densa en frío, la mezcla abierta en frío, las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua, mezcla abierta en caliente y la mezcla discontinua en caliente.

1.1 Material bituminoso

El material bituminoso suele denominarse como asfalto, el cual consiste en una sustancia de color negro que se caracteriza por su alta viscosidad con una consistencia variable. Se origina a partir del procesamiento de hidrocarburos pesados como el petróleo, aunque también se encuentra en yacimientos naturales. Su principal función es actuar como aglomerante en las mezclas asfálticas, es decir, unir las partículas de los materiales (agregados) de tal forma que se garantice su adherencia al mismo tiempo que soportan las cargas a las cuales va a estar sometida

la mezcla. En la figura 1 se observa el aspecto común del material bituminoso (Meneses & Páez, 2017).



Figura 1. Material bituminoso

Fuente: Grupoporrasjuarez, 2020. Obtenido en: http://grupoporrasjuarez.com/unidad_cemento_asfaltico.asp

El INVIAS, en el Capítulo 4: Pavimentos asfálticos, contempla diferentes tipos de material bituminoso, estableciendo detalladamente el tipo que debe emplearse de acuerdo a cada una de las mezclas asfálticas. En el caso de las mezclas asfálticas porosas, éstas deben utilizar el denominado cemento asfáltico modificado con polímeros, el cual consiste en un ligante hidrocarbonado resultante de la interacción física y/o química de polímeros con un cemento asfáltico (asfalto), sin embargo, las demás mezclas deben elaborarse con un tipo de material diferente como se detalla en la tabla 3.

La incorporación de polímeros en el cemento asfáltico convencional, da como resultado el denominado cemento asfáltico modificado con polímeros. Los polímeros son modificadores que permiten mejorar o cambiar determinadas características mecánicas del asfalto convencional. Con la adición de polímeros se busca mejorar la elasticidad, adherencia y cohesión que brinda el material bituminoso (Ayala & Juárez, 2010).

Tabla 3

Material bituminoso a emplear de acuerdo al tipo de mezcla asfáltica

Tipo de mezcla	Material bituminoso a emplear	Tipo	Norma de material bituminoso
Porosa o drenante	Cemento asfáltico modificado con polímeros	I o II	Artículo 414
Densa en frío	Emulsión asfáltica catiónica de rotura lenta	CRL-1 o CRL-1h	Artículo 411
Abierta en frío	Emulsión asfáltica catiónica de rotura media	CRM	Artículo 411
Asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)	Asfalto convencional (cemento asfáltico)	40-50, 60-70 u 80-100	Artículo 410
	Asfalto modificado con polímeros	II (IIa y IIb), III y V	Artículo 414
Abierta en caliente	Cemento asfáltico de acuerdo a los especificado en los documentos del proyecto, si no se especifica, se permite utilizar cemento asfáltico de penetración 60-70	60-70	Artículo 410
Discontinua en caliente	Cemento asfáltico modificado con polímeros	II (IIa y IIb) o III	Artículo 414
	Cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado	II (IIa y IIb) o III	Artículo 413

Nota: Cada tipo de mezcla posee su norma correspondiente. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos.*

Se observa en la tabla 3, que al igual que en las mezclas porosas o drenantes, se permite el uso de cemento asfáltico modificado con polímeros en las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico) y en las mezclas discontinuas en caliente. Esto se debe a que al igual que el concreto asfáltico y la mezcla discontinua, las mezclas porosas son elaboradas y coladas en caliente, sin embargo, ambas mezclas solo coinciden con en el tipo II del material bituminoso de la mezcla porosa. Respecto a la mezcla discontinua, es de añadirse que está al

igual que la mezcla asfáltica porosa presenta una granulométrica con bajo contenido de arena, como se detalla más adelante (INVIAS, 2012).

Cada tipo de material bituminoso presenta unas características que definen su comportamiento en la mezcla. Analizando los artículos 410, 411, 413 y 414 del Capítulo 4- Pavimentos asfálticos del INVIAS, se encuentran que las mayores diferencias respecto al material bituminoso empleado en la mezcla asfáltica porosa, cemento asfáltico modificado con polímeros, se dan con las mezclas densas en frío y abiertas en frío, debido a que estas dos últimas mezclas utilizan emulsiones asfálticas que requieren de ensayos y la obtención de parámetros que no son necesarios en el material bituminoso de las mezclas asfálticas porosas, como viscosidad, estabilidad durante el almacenamiento, sedimentación, destilación, rotura en ensayo de mezcla con cemento, carga de partícula, pH, cubrimiento del agregado y resistencia al desplazamiento, y solubilidad en tricloroetileno; solo existen similitud en la obtención de la penetración y la ductilidad (INVIAS, 2012).

El cemento asfáltico modificado con polímeros, presenta similitudes con los otros tipos de material bituminoso. En la tabla 4 se muestran las características más importantes. Es de resaltar que solo se comparan las propiedades para los tipos de material bituminoso indicados en la tabla 3.

De la tabla 4 puede detallarse que las características del cemento asfáltico modificado con polímeros en los tipo I y tipo II que se permiten para las mezclas asfálticas porosas, se diferencian entre sí en los valores de penetración del asfalto original, ductilidad del asfalto original (el tipo I no exige este valor), recuperación elástica por torsión, penetración del residuo y en la ductilidad del residuo (el tipo I no exige este valor).

Tabla 4

Características exigidas para el material bituminoso

Característica	Cemento asfáltico modificado con polímeros					Asfalto convencional			Cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado	
	Tipo I	Tipo IIa	Tipo IIb	Tipo III	Tipo V	40-50	60-70	80-100	Tipo II	Tipo III
Asfalto original										
Penetración (25° C, 100 g, 5 s), 0.1 mm	55 a 70	40 a 70	55 a 70	55 a 70	15 a 40	40 a 50	60 a 70	80 a 100	25 a 75	50 a 100
Punto de ablandamiento, °C, mínimo	58	58	58	65	65	52 a 58	48 a 54	45 a 52	54	52
Ductilidad (5° C, 5cm/min), cm, mínimo	-	15	15	15	-	80	100	100	-	-
Recuperación elástica por torsión a 25° C, %, mínimo	15	40	40	70	15	-	-	-	-	-
Estabilidad al almacenamiento	5	5	5	5	5	-	-	-	-	-
Contenido de agua, %, máximo	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	-	-
Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland, °C, mínimo	230	230	230	230	230	240	230	230	230	230
Residuo del ensayo de pérdida por calentamiento en película delgada rotatoria										
Pérdida de masa, % máximo	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.8	-	-
Penetración del residuo, en % de la penetración original, mínimo	65	50	65	65	70	55	50	46	75	75
Incremento en el punto de ablandamiento, °C, máximo	10	10	10	10	10	8	9	9	-	-
Ductilidad (5° C, 5cm/min), cm, mínimo	-	8	8	8	-	-	-	-	-	-

Nota: Para calcular cada característica deben seguirse las respectivas normas del INVIAS para cada una de ellas. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos.*

Así mismo, el cemento asfáltico modificado con polímeros tipo II se divide en dos clases: a y b, los cuales se diferencian en los valores de penetración del asfalto original y en el de penetración del residuo. Estas características condicionan la elección del tipo de material bituminoso a utilizar en la mezcla asfáltica porosa (INVIAS, 2012).

El cemento asfáltico modificado con polímeros exige verificar las mismas características para sus distintos tipos, incluidos los tipos III y V de las mezclas asfálticas en caliente de

gradación continua (concreto asfáltico), sin embargo, se presentan diferencias en los valores de penetración del asfalto original, punto de ablandamiento, ductilidad del asfalto original, recuperación elástica por torsión, penetración del residuo y en la ductilidad del residuo. Sin embargo, comparada con el resto de mezclas, el material bituminoso aceptado para las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua son las que presentan mayores similitudes al material requerido para las mezclas asfálticas porosas (INVIAS, 2012).

Respecto al asfalto convencional o cemento asfáltico, se evidencia diferencias entre los valores de cada una de las características comunes, excepto para el contenido de agua. Por otra parte, el cemento asfáltico modificado con polímeros exige características que no son tomadas en cuenta para el asfalto convencional, como la recuperación elástica por torsión, la estabilidad al almacenamiento y la ductilidad del residuo (INVIAS, 2012).

Así mismo, analizando las normas 414 y 410 del Capítulo 4-Pavimentos asfálticos, del INVIAS, se observa que el asfalto convencional o cemento asfáltico requiere verificar características no necesarias para el cemento asfáltico modificado con polímeros, específicamente el índice de penetración, la viscosidad absoluta, la solubilidad en tricloroetileno, el contenido de parafinas y el índice de envejecimiento (INVIAS, 2012).

Por último, el cemento asfáltico modificado con polímeros presenta cuatro (4) características que son igualmente exigidas para el cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado, específicamente la penetración del asfalto original, el punto de ablandamiento, punto de ignición mediante la copa abierta de Cleveland y la penetración del residuo, para estas dos últimas características coinciden los mismos valores establecidos por sus respectivas normas. El resto de características para el cemento asfáltico modificado con polímeros no son necesarias

para el cemento asfáltico modificado con grano de caucho reciclado. Además, este último requiere valores de viscosidad aparente, resiliencia a 25°C y penetración a 4°C (INVIAS, 2012).

En cuanto al porcentaje de material bituminoso a utilizar en la mezcla asfáltica porosa, el Artículo 453: Mezcla drenante, del INVIAS, indica que este valor no debe ser inferior al cuatro y medio por ciento (4,5%), respecto del peso seco de los agregados, incluido el llenante mineral (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Con el fin de evaluar la pertinencia de este porcentaje, López, 2013, llevó a cabo una investigación en la Universidad Nacional de Colombia, en la cual desarrollo mezclas asfálticas porosas utilizando porcentajes de asfalto respecto al peso seco de los agregados del 3,5%, 4,0%, 4,5%, 5,0% y 5,5%, fabricando un total de 103 probetas bajo la metodología Marshall con un porcentaje de vacíos con aire muy similar (aproximadamente 20%). Como resultado de este trabajo concluyó que el porcentaje óptimo de material bituminoso debe ser mayor al 4,5%, verificando lo establecido por el INVIAS. En la tabla 5 se muestra el porcentaje de asfalto óptimo obtenido en otras investigaciones (López, 2013).

Tabla 5.

Porcentaje óptimo de asfalto

Autor	% óptimo asfalto
Arrieta, V.	4,7
Carvajal, A. & Quishpi, O.	6,4
Ayala, M. & Juárez, I.	4,5
Garnica, P. et al.	5,1
Cuentas, J.	4,88

Nota: Los porcentajes fueron calculados aplicando el método de diseño tipo Marshall.

Al igual que López, 2013, los autores mostrados en la tabla 5 establecieron que el porcentaje óptimo de una mezcla asfáltica porosa debe ser superior al 4,5%, sin embargo, se observa que este porcentaje está condicionado a las solicitudes de cada caso en específico, por lo que el valor óptimo puede ser comprendido entre un 4,5% a 6,5% (Garnica, 2005).

1.2 Agregados pétreos

Los agregados pétreos corresponden a materiales granulares de constitución sólida inerte proveniente de ríos y canteras, que pueden ser utilizados en su forma natural o después de efectuarse en ellos un proceso de trituración. Estos agregados deberán presentar unas propiedades que garanticen su adhesividad con el asfalto, y que no sean susceptibles de desprendimiento por la acción del agua o del tránsito vehicular a causa de procesos de meteorización o alteraciones físico-químicas apreciables (Artículo 400 del INVIAS, 2007; Artículo 453 del INVIAS, 2013).

1.2.1 Agregado grueso. Corresponde al material que es retenido en el tamiz No.4 (4,75 mm). Dos aspectos son fundamentales al momento de seleccionar este agregado: la angulosidad y la forma. La angulosidad incide en el rozamiento interno de las partículas pues se busca que estas permanezcan en el mismo sitio y no se produzcan desplazamientos, por lo cual, para aumentar la angulosidad y por tanto aumentar el rozamiento, el agregado grueso es sometido a procesos de trituración para su uso en las mezclas. Por otra parte, la forma del agregado grueso está relacionada a su acomodamiento en la mezcla, es así como se considera como forma ideal

partículas con formas cuboides, evitándose en lo posible el uso de formas planas, alargadas o en forma de láminas, debido a que estas formas son altamente susceptibles a quebrarse, y por tanto alterar las distribuciones granulométricas. En la figura 2 se observan las diferencias entre el agregado grueso en su condición natural (izquierda) y por trituración (derecha) (Artículo 400 del INVIAS, 2007; Rico, Téllez, & Garnica, 1998).

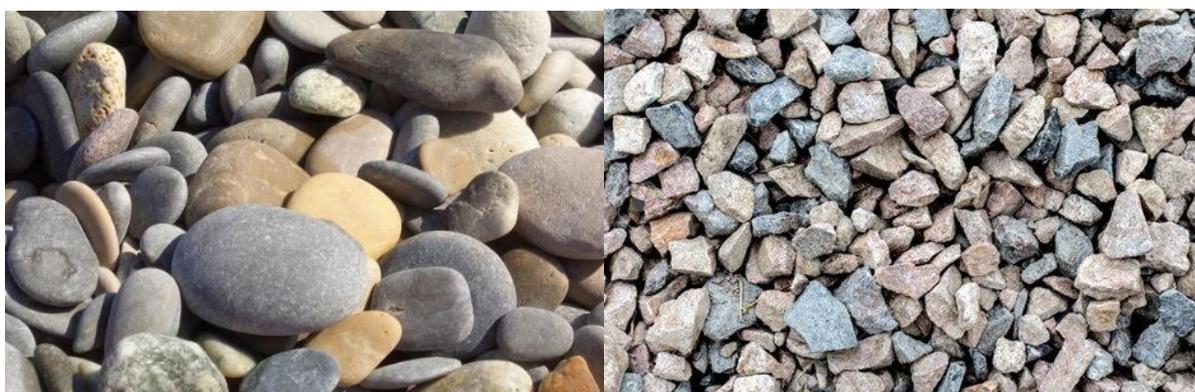


Figura 2. Agregado grueso

Fuente: 360enconcreto, 2020. Obtenido en: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto> ; <http://www.estructuraragregados.com/>

Las mezclas asfálticas porosas al igual que las otras mezclas, exigen del agregado grueso determinados valores para cada una de las características necesarias para su selección, de esta manera se garantiza el comportamiento óptimo del agregado en la mezcla. En la tabla 6 se detallan las características que debe cumplir el agregado grueso para ser usado en la mezcla asfáltica porosa, así como los valores para las demás mezclas.

Observando la tabla 6, se evidencia que los valores para cada una de las características requeridas para el agregado grueso tienden a ser muy similares entre sí para cada uno de los tipos de mezclas asfálticas. El agregado grueso de la mezcla asfáltica porosa presenta diferencias con

el agregado de las otras mezclas en lo referente a los valores de degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, así como en los valores de caras fracturadas. Por lo que puede establecerse que se presentan mayormente similitudes entre los requerimientos del agregado grueso para cada una de las mezclas asfálticas.

Tabla 6

Características que debe cumplir el agregado grueso en las mezclas asfálticas

Característica	Norma de ensayo I.N.V.	Porosa o drenante	Densa en frío	Abierta en frío	Asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)	Abierta en caliente	Discontinua en caliente
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%)							
* 500 revoluciones	E-218	25	25	25	25	35	25
* 100 revoluciones	E-218	5	-	-	5	7	5
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	E-238	20	20-25	20-25	20-25	25-30	20
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos							
* Valor en seco, mínimo (kN)	E-224	110	110	110	110	90	110
* Relación húmedo/seco, mínimo (%)	E-224	75	75	75	75	75	75
Coefficiente de pulimiento acelerado, mínimo	E-232	0,5	0,45	0,45	0,45	-	0,5
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo	E-240	10	10	10	10	10	10
Caras fracturadas, mínimo (%)							
*Una cara	E-227		75-85	75-85	75-85	60-75	100
*Dos caras	E-227	100	60-70	60-75	60-70	-	100
Adhesividad	E-757	Reportar	Reportar	Reportar	Reportar	Reportar	Reportar

Nota: Para calcular cada característica deben seguirse las respectivas normas del INVIAS para cada una de ellas. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos.*

1.2.2 Agregado fino. Corresponde al material que pasa el tamiz No.4 (4,75 mm) y es retenido en el tamiz No.200 (0,075 mm). El agregado fino para las mezclas asfálticas de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos comprende el material denominado como arena, por lo que los términos agregado fino y arena pueden utilizarse, para propósitos de este trabajo, como sinónimos. En la figura 3 se observa un ejemplo de este tipo de agregado.

El agregado fino o arena, se utiliza en una baja proporción en la mezcla asfáltica porosa, con el propósito de permitir la generación de espacios en el agregado grueso libres o vacíos para permitir el paso del agua. En el artículo 453: Mezcla drenante, del INVIAS, se establece que este material debe provenir en su totalidad de procesos de trituración de piedra de cantera o de grava natural, o parcialmente de fuentes naturales de arena. Se permite el uso de arena natural hasta un porcentaje máximo de 15% para vías NT3, y de 25% para niveles de tránsito inferiores (Artículo 453 del INVIAS, 2013).



Figura 3. Agregado fino o arena

Fuente: 360enconcreto, 2020. Obtenido en: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-gravas-y-arenas-para-la-construccion>

Ahora bien, al igual que el agregado grueso, el agregado fino debe cumplir con determinados valores para cada una de las características a considerar para su selección en la mezcla asfáltica porosa. En la tabla 7 se muestran los valores que debe cumplir el agregado fino tanto para la mezcla asfáltica porosa, como para otras mezclas.

De la tabla 7 se observa que existen mayormente similitudes entre las características exigidas para el agregado fino para las mezclas porosas, densas en frío, asfálticas en caliente de gradación continua y discontinua en caliente. Presentando variaciones respecto al agregado fino

de la mezcla porosa en lo referente al sulfato utilizado para determinar las pérdidas en ensayo de solidez, en la adhesividad, y en que no se requiere calcular angularidad.

Las mayores diferencias del agregado fino de la mezcla asfáltica porosa se presentan con el agregado fino de las mezclas abiertas en frío y abiertas en caliente, esto se debe a que en estas dos últimas mezclas se utiliza una muy baja proporción de agregado fino.

Tabla 7

Características que debe cumplir el agregado fino en las mezclas asfálticas

Característica	Norma de ensayo I.N.V.	Porosa o drenante	Densa en frío	Abierta en frío	Asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)	Abierta en caliente	Discontinua en caliente
Pérdidas en ensayo de solidez							
*En sulfato de sodio, máximo (%)	E-220	18	-	-	-	-	-
*En sulfato de magnesio, máximo (%)	E-220	-	18	18	18	18	18
Índice de plasticidad (%)	E-126	N.P	N.P	-	N.P	-	N.P.
Equivalente de arena, mínimo (%)	E-133	50	50	-	50	-	50
Valor de azul de metileno, máximo	E-235	10	10	-	10	-	10
Adhesividad	E-774	Reportar	4	-	4	-	Reportar
Angularidad, Método A, mínimo (%)	E-239		40-45	-	-	-	45

Para calcular cada característica deben seguirse las respectivas normas del INVIAS para cada una de ellas. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos*.

1.3 Llenante mineral

El llenante mineral suele denominarse como polvo mineral o filler. Corresponde al material que pasa por el tamiz No.200 (0,075 mm). Proviene de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos, aunque también puede ser un producto comercial, generalmente cal

hidratada o cemento Portland, en cuyo caso se denominara como llenante mineral de aporte (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

El llenante mineral se combina con los agregados gruesos y finos, con el fin de ocupar los vacíos generados en la estructura granular compactada, reduciendo el volumen de vacíos. En el caso de las mezclas asfálticas porosas, el llenante mineral se utiliza en una proporción que permita obtener el porcentaje de vacíos requeridos en la mezcla, pero, que al mismo tiempo garantice su integridad estructural, pues valores excesivos de vacíos con aire (más del 25%) conllevan una resistencia muy baja ante las cargas. Además, el llenante mineral mejora la acción estabilizante de la mezcla, pues al unirse con el ligante asfáltico brinda mayor resistencia a la acción que produce el agua, especialmente contrarrestando los desplazamientos (Mora & Pérez, 1998).

Al igual que los agregados gruesos y finos, el llenante mineral debe cumplir con los valores especificados en cada una de las características a utilizar en las mezclas asfálticas. En la tabla 8 se detallan estos valores.

Tabla 8

Características que debe cumplir el llenante mineral en las mezclas asfálticas

Característica	Norma de ensayo I.N.V.	Porosa o drenante	Densa en frío	Abierta en frío	Asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)	Abierta en caliente	Discontinua en caliente
Proporción de llenante mineral de aporte: (% en masa del llenante total)		100	-	-	NT2: ≥ 25 ; NT3 ≥ 50	-	≥ 50
Granulometría del llenante mineral de aporte	E-215						
*% que pasa el tamiz No.40 (0,425 mm)		100	100	-	100	-	100
*% que pasa el tamiz No.100 (0,15 mm)		>90	70	-	>90	-	>90
*% que pasa el tamiz No.200 (0,075 mm)		>75	75	-	>75	-	>75
Densidad bulk (g/cm^3)	E-225	0.5 a 0.8	0.5 a 0.8	-	0.5 a 0.8	-	0.5 a 0.8
Vacíos del llenante seco compactado (%)	E-229	≥ 38	≥ 38	-	≥ 38	-	≥ 38

Nota: Para calcular cada característica deben seguirse las respectivas normas del INVIAS para cada una de ellas. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos.*

En la tabla 8 se observa que tanto la mezcla abierta en frío como la mezcla abierta en caliente no especifican valores para el llenante mineral, por lo que se evidencia que no debe ser utilizado este material en este tipo de mezclas. En cuanto a la mezcla asfáltica porosa, presenta iguales requerimientos en lo referente a la densidad bulk y el porcentaje de vacíos del llenante seco compactado, de las mezclas densas en fríos, asfálticas en caliente de gradación continua y con las discontinuas en caliente.

Así mismo, la granulometría del llenante mineral para las mezclas porosas o drenantes, asfálticas en caliente de gradación continua y la discontinua en caliente son idénticas. La única gradación que presenta una variación en el porcentaje que pasa el tamiz No.100 fue la mezcla densa en frío. Es de añadirse que el llenante mineral de la mezcla asfáltica porosa debe ser totalmente de aporte, es decir, cal hidratada o cemento Portland (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

1.4 Franjas granulométricas

Después que se ha verificado que los agregados pétreos, gruesos y finos, y el llenante mineral cumplen con cada una de las características descritas anteriormente, se deben combinar de tal manera que cumplan con los requisitos granulométricos indicados en la tabla 9.

Se observa en la tabla 9 que la franja granulométrica exigida para las mezclas asfálticas porosas presenta mayor similitud con la requerida en la mezcla discontinua en caliente. Respecto a las otras mezclas, existen variaciones sustanciales en los porcentajes requeridos para cada tamiz, de hecho, las mezclas asfálticas en caliente de gradación continua y las mezclas

abiertas en caliente requieren de tamaños de partícula mayores a los permitidos en la gradación de la mezcla porosa. De forma general puede establecerse que todas las mezclas presentan una gradación diferente.

Tabla 9

Requisitos granulométricos de la combinación de los agregados pétreos con el llenante mineral en mezclas asfálticas

Tamiz		% que pasa					
mm	Pulg	Porosa o drenante	Densa en frío	Abierta en frío	Asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)	Abierta en caliente	Discontinua en caliente
50	2"	-	-	-	-	100	-
37,5	1 1/2"	-	-	-	-	75-90	-
25	1"	-	-	-	100	-	-
19	3/4"	100	100	100	80-100	50-70	-
12,5	1/2"	70-100	80-95	70-95	67-95	-	100
9,5	3/8"	50-75	-	-	60-88	-	75-97
4,75	No.4	15-32	50-65	0-30	43-87	8-20.	15-28
2,36	No.8	-	35-50	0-10	-	0-5	-
2	No.10	9-20	-	-	29-61	-	11-22.
0,425	No.40	5-12	-	-	14-29	-	8-16.
0,3	No.50	-	13-23	-	-	-	-
0,18	No.80	-	-	-	8-19.	-	-
0,15	No.100	-	-	-	-	0-5	-
0,075	No.200	3-7	3-8.	0-2	4-10.	-	5-8.

Nota: Los porcentajes para cada tipo de mezcla corresponde a los requeridos para la carpeta de rodadura. INVIAS, 2012. *Capítulo 4-Pavimentos asfálticos.*

Se debe aclarar que las franjas granulométricas presentadas en la tabla 9 son las usadas por cada mezcla específicamente para su uso como carpeta de rodadura, debido a que presentan varias gradaciones según la capa asfáltica a elaborar: carpeta de rodadura, intermedia o base. Las mezclas asfálticas porosas presentan una sola gradación. En la figura 4 se observa la franja granulométrica de esta mezcla.

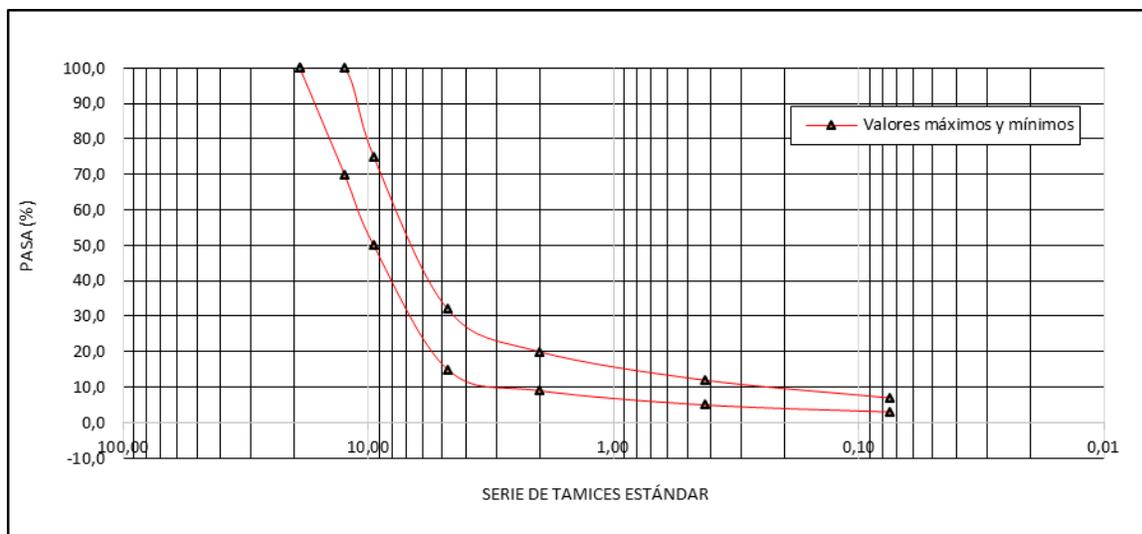


Figura 4. Franja granulométrica para mezclas asfálticas porosas o drenantes

Nota: La distribución de agregados debe estar en el rango mostrado para cada uno de los diámetros de partículas. Adaptado de Artículo 453 Invias, 2007.

Observando la figura 4 y la tabla 9 puede determinarse que la mezcla asfáltica porosa se compone de un 68-85% de agregado grueso, 12-25% de agregado fino y de un 3 a 7% de llenante mineral. Estas proporciones en los agregados son los recomendados por el Instituto Nacional de Vías INVIAS para obtener un correcto funcionamiento de la mezcla, de tal manera que se cumplan los objetivos por los cuales es seleccionada la mezcla asfáltica porosa respecto a las otras mezclas (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

En la figura 5, se observan las franjas granulométricas de tres investigaciones colombianas, mientras que en el figura 6 se muestran las franjas granulométricas de investigaciones realizadas en distintos países, en ambas figuras se tienen en cuenta los límites establecidos por el INVIAS (López, 2013; Arrieta, 2013; Meneses & Páez, 2017).

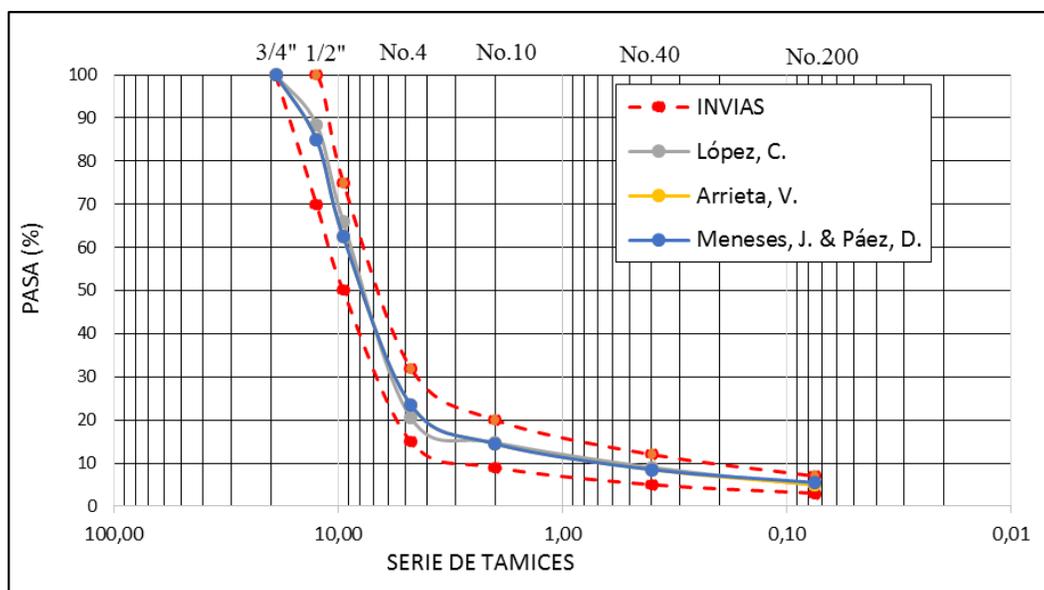


Figura 5. Franjas granulométricas investigaciones colombianas

Nota: Investigaciones llevadas a cabo en universidades colombianas.

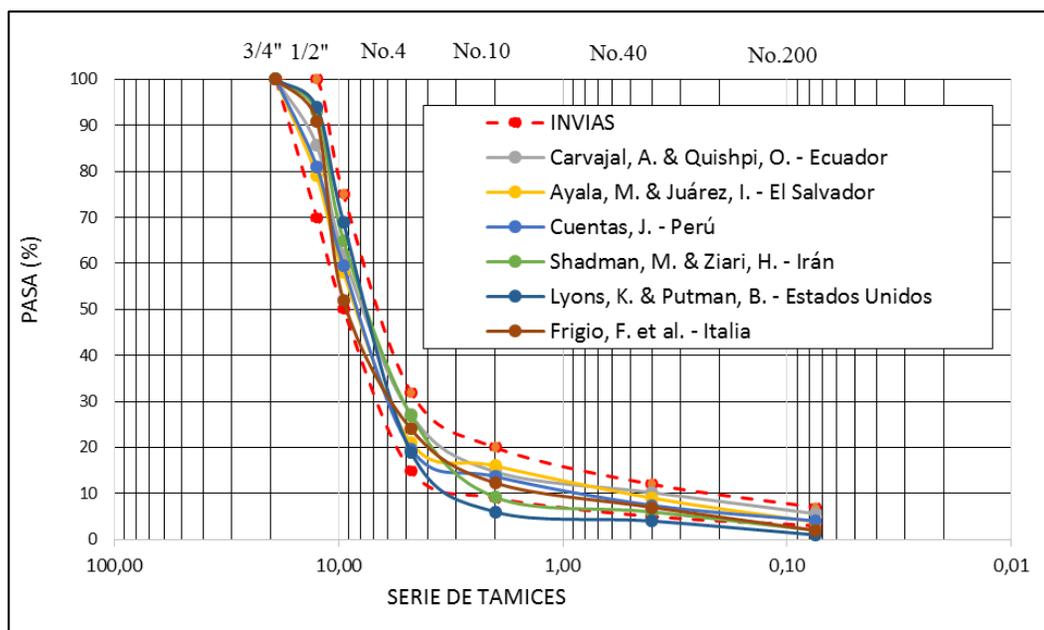


Figura 6. Franjas granulométricas investigaciones hechas en otro países

Nota: La distribución de agregados debe estar en el rango mostrado para cada uno de los diámetros de partículas.

En la figura 5 se muestra claramente que las investigaciones llevadas a cabo en Colombia tomaron como referencia la normativa establecida por el INVIAS, por lo cual cumplen con las franjas granulométricas establecidas por esta institución. Por otra parte, los estudios llevados a cabo en los países indicados en la figura 6 muestran que los requisitos granulométricos del INVIAS, son muy similares a los de esos países, existiendo leves diferencias en el caso de Estados Unidos en cuanto a los tamices de menor diámetro: No.10, No.40 y No.200.

1.5 Aditivos mejoradores de adherencia entre los agregados y el asfalto

Los aditivos aplicados a las mezclas asfálticas porosas buscan mejorar la afinidad química entre el asfalto y el agregado, aumentando de esta forma el desempeño de la mezcla. El Instituto Nacional de Vías INVIAS recomienda su uso solo en los casos en que existan problemas de adhesividad, es decir, de unión de los materiales (Artículo 400 del INVIAS, 2007).

Actualmente en el mercado existe una gran variedad de productos que cumplen este propósito en la mezcla, sin embargo, cuando la mezcla se usada en un pavimento, el aditivo a utilizar debe ser aprobado por la interventoría encargada, y bajo la responsabilidad del constructor.

Capítulo 2. Identificar las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas

En el capítulo 1 se describieron las características que deben cumplir cada uno de los materiales que en conjunto conformaran la mezcla asfáltica porosa o drenante, sin embargo, cuando se elabora la mezcla debe considerarse la obtención de determinadas propiedades tanto físicas como mecánicas que indicaran si esta satisface los requisitos exigidos.

Con el fin de identificar las propiedades físicas y mecánicas más importantes en la mezcla asfáltica porosa, se continuará el desarrollo de este capítulo en base a lo establecido por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, debido a que las normas de esta entidad son aplicables para toda Colombia. Dado que las propiedades de la mezcla dependen de su diseño, primero se detallará la metodología aplicada para diseñar mezclas asfálticas porosas.

2.1 Diseño de mezclas asfálticas porosas

Para iniciar el diseño de una mezcla asfáltica porosa, de acuerdo a los lineamientos del Artículo 453: Mezcla drenante, del INVIAS, se debe partir bajo determinadas condiciones. La primera es diseñar la mezcla con un contenido mínimo de 4,5% de cemento asfáltico modificado con polímeros, como se indicó en el capítulo anterior, las investigaciones llevadas a cabo indican que el contenido óptimo de asfalto está comprendido entre un 4,5% a 6,5%. Se pueden realizar ensayos con diferentes porcentajes de asfalto con la variación que se considere pertinente hasta verificar que porcentaje brinda mejores propiedades (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

La segunda condición es prestar especial cuidado al momento de elaborar la mezcla, a las condiciones de temperatura a la cual esta va a ser sometida. Como se indicó en el capítulo anterior, la mezcla asfáltica porosa debe ser elaborada y colocada en caliente, por lo que la temperatura debe oscilar entre 135°C y 180°C, como se mostró en la tabla 1 del capítulo 1. En la tabla 10 se muestra el rango de temperatura empleado en investigaciones realizadas con este tipo de mezclas (Artículo 453 Invías, 2013).

Tabla 10.

Temperatura de mezclado utilizada en algunas investigaciones

Autor	Temperatura de mezclado (°C)	País
López, C.	173,2 - 176,4	Colombia
Arrieta, V.	144 - 149	Colombia
Meneses, J. & Páez, D.	160-169	Colombia
Ayala, M. & Juárez, I.	160	El Salvador
Garnica, P. et al.	153-158	México
Cuentas, J.	110-120	Perú
Frigio, F, et al.	170	Italia

Nota: Rango de temperatura estimado por los autores de cada investigación.

Se observa en la tabla 10, que el rango de temperatura indicado por el INVÍAS es similar incluso en otros países. El único estudio que empleó un rango de temperatura menor fue la investigación llevada a cabo por Cuentas, J, en el Perú, sin embargo, esto se debe principalmente a las condiciones en las que se llevó a cabo ese estudio, debido a que se buscaba una disminución de las temperaturas de mezclado para reducir las emisiones contaminantes.

Definidos los porcentajes y dispuestos los agregados pétreos y el llenante mineral de aporte, este último debe ser seleccionado por el diseñador bajo su criterio y experiencia, se procede al mezclado de estos materiales para la elaboración de probetas tipo Marshall según lo

indicado en la norma de ensayo I.N.V. E-760: Caracterización de las mezclas asfálticas abiertas por medio del ensayo cántabro de pérdida por desgaste. En la figura 7 se observan este tipo de probetas fabricadas con mezcla asfáltica porosa. El mezclado en obra es realizado mediante la respectiva planta asfáltica, pero, en laboratorio puede realizarse manualmente o mediante una mezcladora automática que simule el comportamiento de una planta asfáltica (Artículo 453 del INVIAS, 2013).



Figura 7. Probetas tipo Marshall

Fuente: Senior Arrieta, 2013. *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cementos asfáltico AC 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación.* p.112

Las probetas deben ser compactadas con 50 golpes por cara empleando el martillo mecánico de compactación Marshall, como el mostrado en la figura 8. Se exigen mínimo cuatro (4) probetas por porcentaje de material bituminoso. A partir de la fabricación de las probetas se pueden ir determinando cada una de las propiedades requeridas para las mezclas asfálticas porosas. Es de especificar que el proceso de diseño de la mezcla incluye la obtención de estas propiedades. Finalmente se escoge el porcentaje óptimo de asfalto a emplear siempre y cuando cumpla con las propiedades descritas a continuación (Artículo 453 del INVIAS, 2013)



Figura 8. Martillo mecánico de compactación Marshall

Fuente: Proetisa, 2020. Obtenido en: <https://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=82>

2.2 Propiedades de las mezclas asfálticas porosas

2.2.1 Resistencia al desgaste. Esta propiedad mecánica, indica la capacidad de la mezcla para soportar las cargas repetitivas originadas por el tránsito vehicular, relacionándose directamente con la rigidez y el contenido presente de material bituminoso en la mezcla, así como con la magnitud de la carga a soportar y el espesor estructural de la capa (Garnica, 2005).

La resistencia al desgaste corresponde al porcentaje de pérdida por desgaste mediante el proceso descrito en la norma I.N.V. E-760. Para obtener este porcentaje se introducen individualmente las probetas tipo Marshall compactadas en la máquina de ensayo de Los Ángeles sin aplicar cargas abrasivas con las esferas, realizando un total de 300 vueltas con una velocidad comprendida entre 30-33 revoluciones por minuto. Finalizado el ensayo se retira la

probeta, y con la diferencia de masas, inicial y final, se obtiene como resultado el porcentaje de pérdida por desgaste, cuyo valor no deberá ser superior a 25%. En la tabla 11 se muestra la resistencia al desgaste (desgaste en seco) obtenida en diferentes estudios llevados a cabo con este tipo de mezclas (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Tabla 11.

Resistencia al desgaste (%)

Autor	Porcentaje de material bituminoso											Material adicional
	3,0%	3,5%	4,0%	4,4%	4,5%	4,8%	5,0%	5,2%	5,5%	6,0%	6,5%	
López, C.	-	32,7	18,9	-	18,5	-	21,6	-	20,6	-	-	-
Arrieta, V.	-	-	-	-	21,0	-	13,0	-	9,0	-	-	-
Ayala, M. & Juárez, I.	41,9	31,2	25,8	-	22,8	-	15,2	-	-	-	-	-
Velasco, J. & Camargo, J.	-	-	-	10,1	-	11,9	-	8,0	-	-	-	Nylon
Velasco, J. & Camargo, J.	-	-	-	17,4	-	15,5	-	20,8	-	-	-	Polipropileno
Cuentas, J.	-	-	-	-	29,2	-	23,5	-	18,2	-	-	-
Shadman, M. & Ziari, H.	-	-	-	-	-	-	-	-	15,6	11,2	8,2	Polipropileno

Nota: Resistencia al desgaste calculado para cada porcentaje de asfalto adicionado a la mezcla.

Se puede observar en la tabla 11, que contenidos de asfalto inferiores al 4% representan valores de pérdida por desgaste superiores al límite superior indicado (25%). Este es un factor decisivo al momento de escoger el contenido óptimo de asfalto, por lo que valores superiores al 4,5% representan valores inferiores al máximo establecido. Así mismo, se evidencia que la adición de materiales como el nylon y el polipropileno permiten obtener mejores resistencias al desgaste.

2.2.2 Contenido de vacíos con aire. Se considera como una propiedad física, en la que los vacíos con aire son las bolsas de aire que se forman entre las partículas que conforman la mezcla después de ser debidamente compactada. Como se mencionó anteriormente, las mezclas

asfálticas porosas deben presentar un contenido de vacíos con aire comprendido entre un 20 a 25% (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Para calcular este porcentaje se aplica la ecuación dada por el INVIAS en la I.N.V. E-736, la cual se aplica en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas, para obtener el porcentaje de vacíos con aire, expresándose en la siguiente expresión (INVIAS, 2012):

$$V_A = \left[1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right] \times 100 \quad (1)$$

Donde V_A es el porcentaje de vacíos con aire en la mezcla compactada, G_{mm} es la gravedad específica máxima, y G_{mb} es la gravedad específica bulk.

La gravedad específica máxima puede ser determinada mediante los procedimientos indicados en la I.N.V. E-735: Gravedad específica máxima de mezclas asfálticas para pavimentos, o con la I.N.V. E-803: Determinación de la gravedad específica máxima y de la densidad máxima de las mezclas asfálticas para pavimentación mediante el método de sellado automático por vacío. Por otra parte, la gravedad específica bulk puede ser determinada mediante la I.N.V. E-802 (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

La gravedad específica es definida como la relación entre la masa de un volumen dado de material, en este caso mezcla asfáltica porosa, y la masa de un volumen igual de agua destilada, libre de gas, a la misma temperatura. La diferencia entre la gravedad específica máxima y la gravedad específica bulk, radica en que la primera se calcula para la mezcla asfáltica en su estado suelo, mientras la segunda para la mezcla asfáltica compactada, es decir, en las respectivas probetas Marshall (INVIAS, 2012).

En la tabla 12 se muestra el contenido de vacíos con aire calculado en investigaciones realizadas hasta la fecha con este tipo de mezclas.

Tabla 12.

Contenido de vacíos con aire calculado (%)

Autor	Porcentaje de material bituminoso								País
	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	5,0%	5,5%	6,0%	6,5%	
López, C.	-	22	22	20,5	19,5	19,5	-	-	Colombia
Arrieta, V.	-	-	-	24,94	23,8	19,62	-	-	Colombia
Carvajal, A. & Quishpi, O.	-	-	21,81	20,98	20,25	19,23	19,06	18,71	Ecuador
Meneses, J. & Páez, D.	-	-	-	23,14	21,98	20,42	19,9	-	Colombia
Ayala, M. & Juárez, I.	22,8	22,2	21,4	19,9	18,5	-	-	-	El Salvador
Garnica, P. et al.	-	-	-	16,2	14,8	15	15,7	16,1	México
Cuentas, J.	-	-	-	19,97	21,41	14,64	-	-	Perú
Shadman, M. & Ziari, H.	-	-	-	-	-	18,6	17,5	17,1	Irán

Nota: Contenido de vacíos con aire calculados a partir de la ecuación 1.

Se observa en la tabla 12, que todos los resultados están por debajo del contenido máximo de vacíos con aire permitido (25%). Así, para cada estudio se observa que a medida que aumenta el contenido de asfalto disminuye el contenido de vacíos con aire.

2.2.3 Permeabilidad. Propiedad física, que en las mezclas asfálticas porosas indica si existe una adecuada interconexión entre los distintos vacíos con aire, además, permiten la realización de la caracterización hidráulica de la mezcla, es decir, de su eficiencia para el manejo del agua (González, 2017).

El artículo 453: Mezcla drenante, del INVIAS, indica un procedimiento sencillo para asegurar la adecuada permeabilidad de la mezcla. Consiste en colocar cien mililitros (100 ml) de agua en un molde o recipiente sobre una probeta tipo Marshall fabricada con la mezcla asfáltica

en estudio, esta probeta debe ser previamente humedecida para poder efectuar el ensayo. El tiempo máximo en que el agua debe atravesar la probeta es de quince segundos (15 s). En la figura 9 se muestra un ejemplo del paso del agua a través de una probeta con mezcla asfáltica porosa, donde se evidencia como debe ser el paso del agua. En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos en dos estudios donde se realizó este ensayo de acuerdo al procedimiento descrito (Artículo 453 del INVIAS, 2013).



Figura 9. Permeabilidad de la mezcla asfáltica porosa o drenante

Fuente: López Moreno, 2013. *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes*. p. 8

Tabla 13.

Resultados ensayo de permeabilidad (segundos)

Autor	Porcentaje de material bituminoso							País
	3,0%	3,5%	4,0%	4,5%	4,7%	5,0%	5,5%	
Ayala, M. & Juárez, I.	5,1	6,2	7,81	10,27	-	16,24	-	El Salvador
Cuentas, J.	-	-	-	7,03	-	9,55	25,56	Perú

Nota: ensayos realizados en laboratorio.

En la tabla 13 puede observarse que al aumentar el contenido de asfalto se presenta un resultado de permeabilidad mayor.

2.2.4 Adhesividad. Propiedad física que indica la correcta adherencia o unión entre las partículas que conforman la mezcla asfáltica porosa. Para evaluar la adhesividad se aplica el mismo procedimiento descrito para obtener la resistencia al desgaste, es decir, se debe obtener el porcentaje de desgaste de las probetas tipo Marshall en la máquina de Los Ángeles, pero, en este caso se deben sumergir en agua cada probeta durante mínimo veinticuatro horas (24 h) a sesenta grados Celsius (60°C). Al aplicar el ensayo se debe obtener un valor máximo de 40% de desgaste, en caso contrario, se descartará el porcentaje de material bituminoso evaluado o se recomendará adicionar un aditivo mejorador de adherencia. En la tabla 14 se muestran los resultados de adhesividad obtenidos en algunas investigaciones (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Tabla 14.

Resultados de adhesividad o pérdida por desgaste en inmersión (%)

Autor	Porcentaje de material bituminoso									Material Adicional
	3,0%	3,5%	4,0%	4,4%	4,5%	4,8%	5,0%	5,2%	5,5%	
López, C.	-	41,44	23,3	-	24,6	-	21,2	-	21,4	-
Arrieta, V.	-	-	-	-	24	-	25	-	26	-
Ayala, M. & Juárez, I.	60,4	48,1	42,9	-	28,7	-	14,6	-	-	-
Velasco, J. & Camargo, J.	-	-	-	36,2	-	31,8	-	33,8	-	Nylon
Velasco, J. & Camargo, J.	-	-	-	45,9	-	46,8	-	45,9	-	Polipropileno
Cuentas, J.	-	-	-	-	45,98	-	40	-	35,8	-

Nota: ensayos realizados en laboratorio.

Se observa en la tabla 14, que el valor de adhesividad disminuye a medida que aumenta el contenido de asfalto en la mezcla.

2.2.5 Propiedades adicionales. Las cuatro propiedades anteriores: resistencia al desgaste, contenido de vacíos con aire, permeabilidad y adhesividad, son las más importantes al momento

de evaluar mezclas asfálticas porosas, debido a que son exigidas directamente por en el artículo correspondiente a estas mezclas, y cuentas con valores que deben ser cumplidos para propiedad. Sin embargo, al igual que en las demás mezclas (densas, abiertas, discontinuas,...) se pueden efectuar ensayos para evaluar otras propiedades que permitan observar un comportamiento más detallado de la mezcla. Entre estas propiedades se encuentran: estabilidad y flujo, tracción indirecta y el módulo dinámica, cada uno de estas puede ser calculada siguiendo las indicaciones de la norma correspondiente.

2.3 Aspectos a verificar para garantizar la calidad de mezclas asfálticas porosas en el pavimento

En el capítulo 4, se describe el procedimiento de diseño y construcción de un pavimento poroso, por ahora se explicarán los aspectos que son necesarios verificar para garantizar un desempeño adecuado de la mezcla asfáltica.

2.3.1 Compactación. Con la compactación se busca que la mezcla asfáltica obtenga su densidad óptima, considerándose como uno de los procesos más delicados e importantes ya que de este depende en gran parte la calidad final de la carpeta de rodadura. La compactación final de la mezcla en campo debe ser mínimo del 95% respecto a la densidad de diseño (Artículo 400 del INVIAS, 2007).

Los procesos de compactación aplicados a las mezclas asfálticas porosas corresponden a los mismos efectuados en otro tipo de mezclas, con la diferencia de que las mezclas porosas

requieren menores esfuerzos de compactación para asegurar que se mantenga el contenido de vacíos con aire. Los equipos utilizados para tal fin generalmente corresponden a compactadores neumáticos (ver figura 10), vibratorios y rodillos lisos sin vibración, la elección del equipo está condicionada a los requerimientos de la mezcla y a las condiciones del proyecto (Artículo 453 del INVIAS, 2013).



Figura 10. Compactador neumático

Fuente: Case Construction, 2020. Obtenido en: <https://www.casece.com/latam/es-la/productos/rodillos-compactadores/rodillos-compactadores/modelos/pt240>

2.3.2 Espesor. Con el fin de garantizar el cumplimiento de los requisitos con los cuales se diseña la mezcla, se hace necesario determinar el espesor medio de la capa compactada, está no deberá ser inferior al espesor de diseño. Como única salvedad se permitirá que en la toma de espesores individuales un solo valor este por debajo del noventa por ciento del espesor de diseño. En el capítulo 4 se muestran los espesores recomendados para pavimentos porosos (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

2.3.3 Planicidad o lisura. Hace referencia a las irregularidades presentes en la superficie acabada de la carpeta de rodadura. Para verificar este aspecto se emplea la norma I.N.V. E-793-

13: Medida de la irregularidad superficial de un pavimento mediante la regla de tres metros, estática o rodante, como la mostrada en la figura 11. La elección del tipo de regla depende de la longitud de la superficie a estudiar. La superficie no deberá presentar irregularidades mayores a diez milímetros (10 mm) (Artículo 453 del INVÍAS, 2013).



Figura 11. Regla rodante

Fuente: Doc Player, 2020. Obtenido en: <https://docplayer.es/80034897-Introduccion-descripcion-de-equipos-de-auscultaciones.html>

Las irregularidades presentes en la superficie del pavimento, dan indicios claros de la correcta distribución de los agregados en la mezcla, así como un proceso de compactación adecuado, pues estas irregularidades pueden conllevar a variaciones en las cargas dinámicas que generan los vehículos, además, afectan la circulación (Artículo 453 Invías, 2013).

2.3.4 Textura. Indica la profundidad promedio que se presenta en la superficie de rodadura de la mezcla asfáltica compactada y acabada. Para comprobar la textura se emplea la norma de ensayo I.N.V. E-791: Medida de la macrotextura superficial de un pavimento empleando la técnica volumétrica. Al realizar el procedimiento de ensayo debe obtenerse una profundidad promedio mayor a quince décimas de milímetro (Artículo 453 Invías, 2013).

2.3.5 Resistencia al deslizamiento. Indica si la mezcla asfáltica es capaz de asegurar una correcta adherencia entre la superficie de rodamiento y el neumático, especialmente en condiciones de humedad. Para estimar esta resistencia se emplea la norma I.N.V. E-792: Medida del coeficiente de resistencia al deslizamiento usando el péndulo británico. En la figura 12 se muestra el ensayo ejecutado en campo con el péndulo británico (Artículo 453 Inviás, 2013).



Figura 12. Ensayo con el péndulo británico

Fuente: Tres Ingenieros, 2020. Obtenido en: <https://www.tresingenieros.com/planificacion-y-gestion-de-la-infraestructura-vial/planificacion-y-gestion-de-la-infraestructura-vial-26-evaluacion-tecnica-de-pavimentos-3-medicion-de-la-friccion/>

El ensayo debe ser realizado 30 días después de entrar en servicio la carpeta de rodadura elaborada con la mezcla asfáltica porosa. Se toman medidas en distintos puntos de la vía, específicamente en las zonas en tangente, curvas horizontales y zonas singulares (glorietas, intersecciones, zona de frenado, entre otras). El valor mínimo admisible del coeficiente de resistencia al deslizamiento es de 0,55 para zonas de tangente, y 0,60 para las demás zonas (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

2.3.6 Regularidad superficial (rugosidad). Este término hace referencia a la desviación que se presenta en la superficie de una mezcla asfáltica debidamente terminada respecto a una superficie plana teórica. La regularidad superficial tiene implicaciones directas en el drenaje de las aguas y la calidad de manejo para los conductores al afectar la dinámica de los vehículos (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Para medir la rugosidad se emplea el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) utilizando los procedimientos indicados en la norma I.N.V. E-794: Cálculo del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) de pavimentos de carreteras. La unidad en que se expresa los valores del IRI son m/km. Los valores permitidos para el IRI en mezclas asfálticas porosas son los indicados en la tabla 15 (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

Tabla 15

Valores máximos admisibles de IRI (m/km)

Porcentaje de hectómetros	Pavimentos de construcción nueva y rehabilitados en espesor >100 mm	Pavimentos rehabilitados en espesor ≤100 mm
40	1,4	1,9
80	2	2,5
100	2,5	3

Nota: Los valores se aplican para los niveles de tránsito 2 y 3. Artículo 453 Invias, 2007.

Para definir o calcular el IRI, se utiliza un modelo matemático que simula la suspensión y las masas de una cuarta parte de un vehículo tipificado (cuarto de carro), que circula a 80 km/h por el tramo de carretera que se pretende evaluar. Deben considerarse en este cálculo los parámetros que definen las masas, rigideces y amortiguaciones de este vehículo, así como conocer el perfil longitudinal de la carretera, definidos por sus cotas en intervalos de longitud constante (Artículo 453 del INVIAS, 2013).

2.3.7 Segregación térmica. Se produce cuando en el transporte y colocación de la mezcla asfáltica se presentan distintas temperaturas lo que conlleva a la obtención de distintas densidades dentro de una misma superficie. El INVÍAS solo exige que se realice un debido registro fotográfico mediante cámaras infrarrojas de las temperaturas en las que se realizó la extensión de las mezclas, así como la compactación de éstas como evidencia si llegasen a presentarse alteraciones graves en el pavimento. De presentarse alteraciones, este registro puede estudiarse para determinar si las variaciones de temperatura son la causa de las fallas presentadas en la superficie del pavimento. En la figura 13 se observa un ejemplo de este tipo de fotografías (Artículo 453 del INVÍAS, 2013).

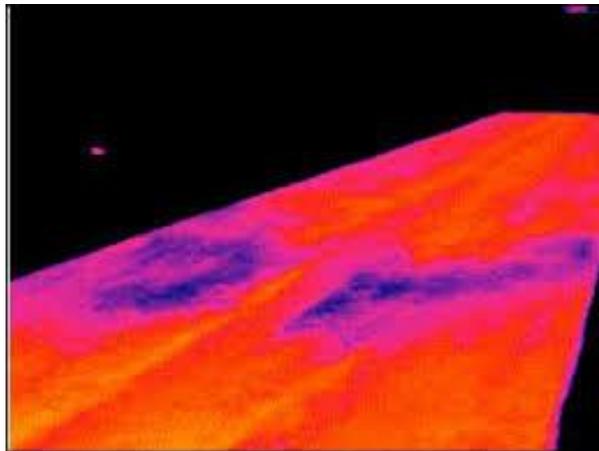


Figura 13. Fotografía infrarroja
Fuente: Segerpalm, Johannes, 2020. *Auscultación termográfica*. p. 5

2.4 Estudios sobre las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas

En Colombia, al igual que otros países, se han desarrollado investigaciones donde se ha buscado determinar las ventajas y desventajas que representa el empleo de mezclas asfálticas

porosas o drenantes. Para poder dar conclusiones sobre estas mezclas, en estos estudios se realizaron pruebas de laboratorio acorde a las normas de cada país.

En el capítulo 1 se mencionó que López, 2013, determinó en laboratorio que el porcentaje óptimo de material bituminoso en la mezcla es del 4,5%, sin embargo, también realizó los demás ensayos necesarios requeridos por las normas del Instituto Nacional de Vías, pero, añadió otros ensayos que generalmente son efectuados en otro tipo de mezclas, específicamente ensayos de estabilidad, flujo, tracción indirecta y módulo dinámico, todo ello con el fin de realizar una comparación más completa de los valores obtenidos con distintos porcentajes de material bituminoso, aunque no realizó los mismos ensayos en una mezcla convencional, por lo que su conclusión más importante se limita a recomendar el uso de más de 4,5% de material bituminoso en la mezcla (López, 2013).

Otra investigación fue llevada a cabo por Arrieta, 2013, en la Universidad Nacional de Colombia con sede en Medellín, Antioquia. La investigación consistió en diseñar mezclas asfálticas porosas o drenantes tibias a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación. Antes de mostrar sus conclusiones, puede detallarse que este estudio no cumple con el primer requerimiento exigido por el INVIAS para las mezclas asfálticas porosas o drenantes, que es el diseño y colocación en caliente, sin embargo, justificaron esta decisión en que las mezclas tibias permiten una reducción en la temperatura de mezclado y compactación, en un rango que oscila de 20°C a 50°C, por lo que se reduce a su vez la emisión de gases nocivos a la atmósfera, entre otros beneficios (Arrieta, 2013).

La incorporación del aditivo licomont BS-100, fue establecida ya que está al ser una amida grasa permite reducir la temperatura requerida de la mezcla. Por su parte el uso del cemento asfáltico AC 60-70, fue por decisión del investigador. Es de resaltarse, que el diseño de las

mezclas y la fabricación de las probetas de ensayo, se realizaron acorde a lo establecido en el Artículo 453: Mezcla drenante, y el Artículo 450: Mezclas asfálticas en caliente, ambos del INVIAS, cambiando únicamente la temperatura de sometimiento de la mezcla (Artículo 453 Invías, 2013; Arrieta, 2013).

Como resultado de esta investigación, Arrieta, 2013, concluyo que la incorporación del aditivo licomont BS-100, si permite reducir la temperatura en el mezclado, oscilando la temperatura requerida en el mezclado entre 144°C a 149°C. Mientras que las mezclas sin este aditivo requirieron en promedio 20°C adicionales (Arrieta, 2013).

Otra investigación desarrollada en Colombia, fue llevada a cabo por Meneses y Páez, 2017, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en la ciudad de Bogotá, con el propósito de desarrollar una mezcla porosa o drenante para ser aplicada en vías rurales. En el estudio realizaron diseños y ensayos en tres tipos de mezclas, la primera una mezcla porosa convencional, la segunda una mezcla porosa con aditivo Zycotherm, y la tercera una mezcla porosa con una granulometría especial, denominada Bailey. Aplicaron todos los ensayos indicados por el INVIAS. Como resultado de este trabajo concluyeron que ninguna de las mezclas elaboradas cumplió con los requisitos mínimos. Esto pudo deberse a un mal proceso de selección de los materiales, o a fallas humanas durante el proceso. Sin embargo, indicaron que las mejores propiedades obtenidas se dieron en la mezcla con el aditivo Zycotherm (Meneses & Páez, 2017).

En otros países también se han desarrollado estudios referentes a las mezclas asfálticas porosas o drenantes. En El Salvador, Ayala y Juárez, efectuaron una investigación en la Universidad de El Salvador, en la cual realizaron el diseño de una mezcla drenante con asfalto modificado disponible en este país. Es de resaltar que en este país centroamericano no existe una

normativa para el uso de este tipo de mezclas, por lo que tomaron como referencias las normas de países como Colombia, España y Chile. En el caso de la selección del material bituminoso y demás aspectos de la mezcla se basaron en lo establecido por el INVIAS de Colombia (Ayala & Juárez, 2010).

Para elaborar la mezcla utilizaron una granulometría compuesta de 83% agregado grueso, 13% agregado fino, y 4% de llenante mineral, representando el peso seco de la mezcla. Después aplicaron varios porcentajes de material bituminoso respecto a este peso seco, realizando todos los ensayos solicitados por la norma INVIAS (Ayala & Juárez, 2010).

Como resultado de su trabajo concluyeron que los porcentaje de material bituminoso a emplear en la mezcla deben estar cercanos al 4%, pues al utilizar porcentajes mayores se obtienen porcentajes de desgaste en la máquina de los Ángeles en porcentajes mayores al 40%, en la condición seca de las probetas tipo Marshall, lo cual no es un resultado aceptable (Ayala & Juárez, 2010).

En Ecuador, Carvajal y Quishpi, de la Universidad de Cuenca, Ecuador, propusieron el diseño de una mezcla asfáltica porosa, incluyendo además, la estructura completa del pavimento, para el aeropuerto Mariscal La Mar de la ciudad de Cuenca, Ecuador: Como resultado de este trabajo concluyeron que la mezcla asfáltica porosa representa mayores ventajas para el manejo del agua, aunque más costosa que la convencional. Sin embargo, recalcan que los beneficios que genera esta mezcla compensan los aspectos económicos, sobre todo al evitar la inundación del aeropuerto (Carvajal & Quishpi, 2018).

En los capítulos siguientes se detallan otras investigaciones realizadas con las mezclas asfálticas porosas o drenantes, pero, incluyendo otros aspectos, como el manejo del agua y la evacuación de precipitaciones elevadas.

Capítulo 3. Conocer las normativas nacionales e internacionales actuales para el uso de las mezclas asfálticas porosas

Los países donde se inició el desarrollo de las mezclas asfálticas porosas fueron Reino Unido y Estados Unidos en los años cuarenta del siglo XX, empleándolas en algunos aeropuertos en capas de 2 centímetros (2 cm), con el fin de disminuir el deslizamiento de las aeronaves. En este entonces se manejó un diseño totalmente empírico, pues el fin era comprobar si la disminución del agregado fino en la mezcla permitía drenar las aguas lluvias (Campos, 2008).

Posteriormente, el concepto de mezcla asfáltica porosa o drenante fue introducido en otros países donde se inició el análisis de las ventajas que podría representar su utilización. En Francia en 1968, se construyeron superficies de pavimento para evaluar el efecto que producía la acumulación de sedimentos, comprobando que después de más de 10 años de servicio, la superficie porosa mantenía una buena rugosidad y drenaje (Campos, 2008).

En otros países también se efectuó la construcción de superficies con mezclas asfálticas porosas, aunque basados en las experiencias anteriores. En Australia (en 1973), Suiza (en 1979), Japón (en 1987) y Bélgica (1990), se comprobó que el pavimento construido con este tipo de mezclas, permite el drenaje del agua y disminuye considerablemente el ruido generado por el paso de los vehículos (Yalcinkaya, s.f.; Isenring, Köster, & Scazziga, s.f; Heystraeten & Moraux, 1990).

A pesar de lo efectuado en los anteriores países, fue en España donde se desarrolló una metodología de diseño de mezclas asfálticas porosas o drenantes, siendo la primera recomendación confiable sobre el uso de este tipo de mezclas. La Dirección General de

Carreteras de España, sugirió en los años 80, emplear una carpeta de rodadura con esta mezcla en espesores de 3 a 5 cm. Desde entonces se incluyeron las mezclas asfálticas porosas o drenantes como una alternativa para la pavimentación de vías (Carvajal & Quishpi, 2018; Briggs, 2006).

En los años 90, las mezclas asfálticas porosas o drenantes fueron incluidas dentro de las normativas viales de numerosos países, entre ellos Colombia. Actualmente, y como se evidenció en los dos capítulos anteriores del presente trabajo, estas mezclas cuentan con una norma establecida por el Instituto Nacional de Vías INVIAS, que puede ser aplicada en todo el territorio Nacional. Así mismo, el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, de la ciudad de Bogotá, permite el uso de estas mezclas, contando con una norma actualizada para su empleo en el Área Metropolitana de la ciudad.

A continuación, se muestra una comparación de las normas vigentes en Colombia y en España y México referentes a las mezclas asfálticas porosas o drenantes, con el fin de detallar las similitudes y diferencias que presentan. Se realiza esta comparación con la normativa española, debido a que está es la norma referente para muchos países. Por su parte México es uno de los países donde más se han efectuado pavimentaciones con este tipo de mezclas, como se detalla en el capítulo 6.

3.1 Normas de Colombia, España y México sobre el uso de mezclas asfálticas porosas

En Colombia, el uso de mezclas asfálticas porosas está reglamentado por dos normas. La primera y más importante, al aplicar para todo el territorio colombiano, es el Artículo 453: Mezcla drenante, del Instituto Nacional de Vías INVIAS, donde se dan las disposiciones

generales para la elaboración, transporte, colocación y compactación de este tipo de mezcla preparada y colocada en caliente. La segunda norma, aplicable para el Área Metropolitana de la ciudad de Bogotá, es la Sección 512: Mezcla asfáltica drenante en caliente, del Instituto de Desarrollo Urbano IDU (Artículo 453 del INVIAS, 2013; Sección 512 del IDU, 2011).

En España, las mezclas asfálticas porosas están reguladas por la norma UNE-EN 13108-7, sin embargo, en la Sección 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura, mezclas drenantes y discontinuas, del Boletín Oficial del Estado BOE, de este país, se amplían las consideraciones generales para el uso de estas mezclas. Se extraerá la información de este último (Sección 543 del BOE, 2011).

En México, no se utiliza el término mezclas porosas o drenantes. Se emplea la denominación: mezcla asfáltica de granulometría abierta, siendo reglamentada por la norma N.CMT.4.04/17: Materiales para pavimentos, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de los Estados Unidos Mexicanos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2017).

A continuación, se describen las similitudes y diferencias de estas cuatro normas en lo referente a las características más importantes a considerar en su utilización. Como partida, se puede resaltar que un aspecto común en todas las anteriores normas es que las mezclas asfálticas porosas o drenantes deben ser elaboradas y colocadas en caliente.

3.1.1 Material bituminoso. Como se mencionó en el capítulo 1, este material es la sustancia encargada de aglomerar o unir los agregados pétreos y el llenante mineral. En el caso de las mezclas asfálticas porosas, el material bituminoso utilizado debe garantizar la correcta

unión de los materiales al mismo tiempo que facilita la generación de vacíos. En la tabla 16 se muestra el material bituminoso aceptado por cada norma.

Tabla 16

Material bituminoso aceptado en Colombia, España y México

País	Norma	Material bituminoso
Colombia	INVIAS	Cemento asfáltico modificado con polímeros
Colombia	IDU	Cemento asfáltico modificado con polímeros
España	BOE	Cemento asfáltico convencional
México	N.CMT	Cemento asfáltico convencional

Nota: La clasificación del material bituminoso es similar entre los 3 países. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

Se observa en la tabla 16 que las normas colombianas permiten el uso del mismo tipo de material bituminoso en la mezcla porosa o drenante, pero, se diferencian del material usado en España y México, aunque estos dos últimos coinciden en el tipo de material. Las características del cemento asfáltico convencional aceptado tanto en España como en México, son muy similares a las descritas en la tabla 4 del capítulo 1.

3.1.2 Contenido de vacíos con aire. El contenido de vacíos con aire es la propiedad que más define a las mezclas asfálticas porosas, pues el porcentaje obtenido permite establecer si permitirán un adecuado drenaje del agua. En la tabla 17 se muestra el porcentaje de vacíos con aire establecido para cada una de las normas.

Tabla 17

Contenido de vacíos con aire para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México

País	Norma	Porcentaje de vacíos con aire (%)
Colombia	INVIAS	20-25
Colombia	IDU	20-25
España	BOE	≥20
México	N.CMT	≥18

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

En la tabla 17 se observan las primeras diferencias entre las cuatro normas en comparación. Las dos normas aplicables en Colombia consideran el mismo porcentaje para las mezclas asfálticas porosas o drenantes, estableciendo un porcentaje mínimo (20%) y máximo (25%). Mientras que, en España, se establece un porcentaje mínimo (20%), que coincide con el de Colombia, pero, no se fija un valor máximo. Por su parte, en México utilizan un porcentaje menor (18%) y tampoco se establece un valor máximo.

3.1.3 Agregado pétreo. Los agregados pétreos constituyen en conjunto el mayor porcentaje de la mezcla asfáltica porosa, todas las normas incluyen ensayos para estos materiales. Así mismo, en todas ellas se hace una separación del agregado pétreo en agregado grueso y fino.

3.1.3.1 Agregado grueso. Tanto en Colombia como en México se considera como agregado grueso el material retenido en el tamiz No.4 (4,75 mm), mientras que en España se

considera a el material retenido en el tamiz de diámetro 2 mm. En la tabla 18 se muestran los valores requeridos en el agregado grueso para cada característica considerada en las cuatro normas.

Tabla 18

Características del agregado grueso para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México.

Característica	Colombia		España	México
	INVIAS	IDU	BOE	N.CMT
Desgaste en la máquina de los ángeles, máximo (%)				
* 500 revoluciones	25	25-30	25	30
* 100 revoluciones	5	-	-	-
Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	20	20-25	-	15
Resistencia mecánica por el método del 10% de finos				
* Valor en seco, mínimo (kN)	110	75-110	-	-
* Relación húmedo/seco, mínimo (%)	75	75	-	-
Coefficiente de pulimiento acelerado, mínimo	0,5	0,45-0,50	0,44-0,56	-
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	0,5	-	0,5	-
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	10	20-25	25	35
Caras fracturadas, mínimo (%)				
*Una cara	-	75-90	-	100
*Dos caras	100	60-75	-	90
Adhesividad	Reportar	-	-	-
Análisis petrográfico	-	Calcular	-	-
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos de magnesio, % Máximo	-	18	-	20

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

De la tabla 18 pueden evidenciarse varias similitudes y diferencias entre las cuatro normas. La primera es que solo dos características son exigidas en común en las cuatro normas, específicamente el porcentaje de desgaste en la máquina de Los Ángeles, y el porcentaje de partículas planas y alargadas.

Algunas características son exigidas por algunas normas, mientras que otras no consideran necesario su obtención. Por ejemplo, la norma BOE de España solo exige 4 características para el agregado grueso, mientras que la norma del INVIAS pide diez (10), la del IDU diez (10) y la norma mexicana seis (6). La norma del INVIAS y del IDU son las que presentan mayores requerimientos en común.

Las normas colombianas exigen características individuales que no son requeridas en las otras normas. El INVIAS, pide calcular la adhesividad del agregado y reportar este valor, mientras que la norma del IDU es la única que pide realizar un análisis petrográfico del material. Con dicho análisis se calcula la textura y la composición mineralógica.

En general, se presentan leves variaciones en los valores de las características en cada norma, no obstante, también existen valores idénticos. Por ejemplo, el porcentaje de desgaste en la máquina de Los Ángeles y el porcentaje máximo de impurezas en el agregado, son iguales tanto para la norma del INVIAS como para la norma BOE, aunque en el resto de características poseen valores diferentes. La norma mexicana exige seis (6) características comunes con la norma del IDU, y cinco (5) respecto al INVIAS, sin embargo, en todos los valores difieren, pero, no en un rango muy alto.

3.1.3.2 Agregado fino. Tanto en Colombia como en México se considera como agregado fino o arena, al material que pasa el tamiz No.4 (4,75 mm) y es retenido en el tamiz No.200 (0,075 mm), mientras que en España se considera es al material que pasa el tamiz de 2 mm y es retenido en el tamiz de 0,063 mm. En la tabla 19 se muestran los valores requeridos en el agregado fino para cada característica considerada en las cuatro normas.

Tabla 19

Características del agregado fino para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México

Característica	Colombia		España	México
	INVIAS	IDU	BOE	N.CMT
Pérdidas en ensayo de solidez				
*En sulfato de sodio, máximo (%)	18	-	-	-
*En sulfato de magnesio, máximo (%)	-	18	-	-
Índice de plasticidad (%)	N.P.	N.P.	-	-
Equivalente de arena, mínimo (%)	50	40	-	55
Valor de azul de metileno, máximo	10	8	-	12
Adhesividad	Reportar	-	-	-
Angularidad, Método A, mínimo (%)	-	45	-	45
Densidad relativa del material seco	-	-	-	2,4

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

En la tabla 19 se observa que la norma BOE de España no establece ningún requerimiento para el agregado fino, en esta norma solo se recomienda utilizar un agregado fino obtenido de procesos de trituración de agregados gruesos que cumplan con lo estipulado en la tabla 12, y que sea libre de materias extrañas (Sección 543 del BOE, 2011).

En cuanto al resto de características, solo las normas colombianas exigen ensayos por pérdidas de solidez, aunque la norma mexicana es la única que exige calcular la densidad relativa del material seco. Así mismo, solo el INVIAS exige calcular el valor de adhesividad.

Respecto a valores similares, el único requerimiento idéntico, es el valor de angularidad mínimo exigido tanto por el IDU como por la norma mexicana. El resto de características comunes presentan valores diferentes. La norma del INVIAS y del IDU, son los que presentan mayores requerimientos comunes.

3.1.4 Llenante mineral. Tanto en Colombia como en México se considera llenante mineral al material que pasa el tamiz No. 200 (0,075 mm), mientras que en España es el material que pasa el tamiz de diámetro (0,063 mm). En la tabla 20 se muestran los valores requeridos en el agregado fino para cada característica considerada en las cuatro normas.

Tabla 20

Características del llenante mineral para las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México

Característica	Colombia		España	México
	INVIAS	IDU	BOE	N.CMT
Proporción de llenante mineral de aporte: (% en masa del llenante total)	100	50	50-100	-
Granulometría del llenante mineral de aporte				
*% que pasa el tamiz No.40 (0,425 mm)	100	-	-	-
*% que pasa el tamiz No.100 (0,15 mm)	>90	-	-	-
*% que pasa el tamiz No.200 (0,075 mm)	>75	-	-	-
Densidad bulk (g/cm ³)	0,5 a 0,8	0,5 a 0,8	0,5 a 0,8	-
Vacíos del llenante seco compactado (%)	≥38	-	-	-

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

En la tabla 20 se observa que la norma del INVIAS es la que más requerimientos solicita para el llenante mineral, estableciendo requerimientos granulométricos que no son considerados en las otras tres (3) normas. Además, es la única en exigir el porcentaje de vacíos del llenante seco compactado. Por otra parte, la norma mexicana no exige ninguna característica para el llenante mineral.

La densidad bulk presenta el mismo rango aceptable para las tres normas: INVIAS, IDU y BOE. Mientras que la proporción de llenante mineral de aporte presenta variaciones, mientras para el INVIAS el llenante mineral debe ser totalmente de aporte, en el IDU se permite como mínimo un 50%, y en España se acepta un rango entre 50 y 100%.

3.1.5 Granulometría. Como ya se mencionó, España presenta una separación de los agregados gruesos, finos y del llenante mineral diferente a la usada en Colombia y México. Sin embargo, también se presentan diferencias en los requerimientos exigidos para cada uno de los tamices a emplear para la obtención de los agregados. En la tabla 21 se muestra la granulometría exigida por cada norma.

Tabla 21

Requerimientos granulométricos de las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México

Tamiz		Colombia		España	México
mm	Pulg	INVIAS	IDU	BOE	N.CTM
19	3/4"	100	100	-	100
16	0,62"	-	-	100,00	-
12,5	1/2"	70-100	70-100	-	65-100
11,2	0,44"	-	-	90-100	-
9,5	3/8"	50-75	50-75	-	48-72
8	0,31"	-	-	50-70	-
4,75	No.4	15-32	15-32	-	18-38
4	0,16"	-	-	13-27	-
2,36	No.8	-	-	-	-
2	No.10	9-20	9-20.	10-17.	15-33
0,85	No.20	-	-	-	12-28.
0,5	0,02	-	-	5-12.	-
0,425	No.40	5-12	5-12.	-	-
0,3	No.50	-	-	-	-
0,18	No.80	-	-	-	-
0,15	No.100	-	-	-	5-19.
0,075	No.200	3-7	3-7.	-	2-4.
0,063	0,002	-	-	3-6.	-

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

En la tabla 21 se observa que el INVIAS y el IDU presentan los mismos requerimientos granulométricos para los agregados para cada uno de los porcentajes por tamiz, mientras que existen variaciones respecto a las normas tanto española como mexicana, pues consideran el empleo de tamices con diámetros diferentes y en proporciones distintas. Sin embargo, las normas

colombianas se asemejan en la mexicana en el valor del Tamaño Máximo Nominal (19 mm), mientras que la norma BOE considera un TMN menor (16 mm).

Con el fin de detallar mejor las franjas granulométricas de cada una de las normas, se muestra en el figura 14 una representación de éstas, pero, considerando el valor promedio para cada tamiz, acorde a los rangos mostrados en la tabla 21.

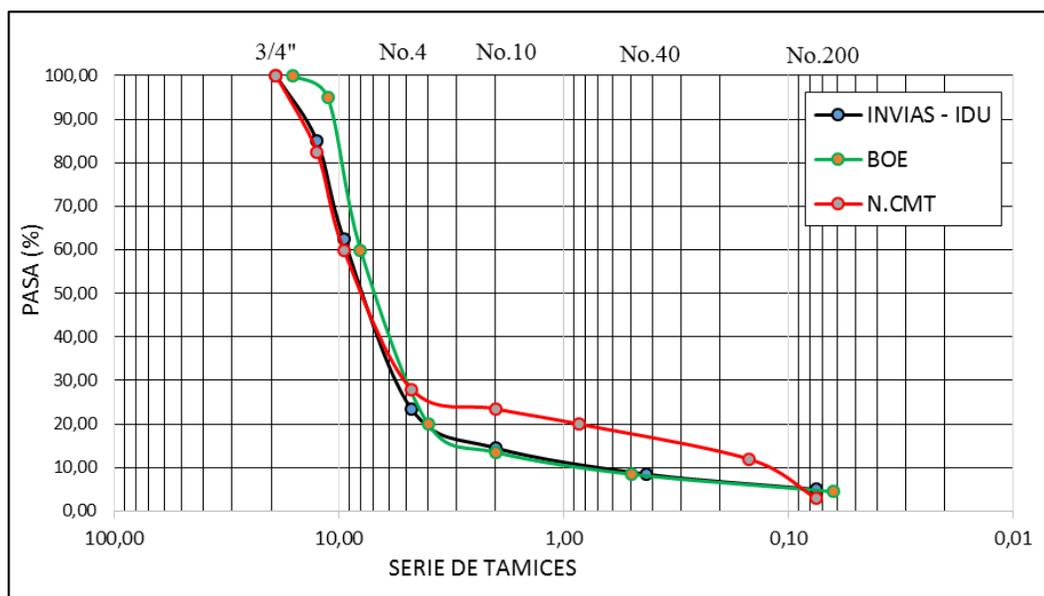


Figura 14. Requerimientos granulométricos de las mezclas asfálticas porosas de Colombia, España y México

Nota: Los valores son aplicables para cada país. Normas INVIAS, IDU, BOE y N.CMT.

Con la figura 14, se pueden observar mejor las distribuciones granulométricas promedio para cada norma. Se puede detallar que el agregado grueso, retenido hasta el tamiz No.4 (4,75 mm) requerido por el INVIAS y el IDU, es muy similar o casi idéntico al exigido por la norma N.CMT de México., mientras que la norma BOE se separa un poco de estos valores.

En cambio, la norma BOE presenta similares o casi idénticos requerimientos granulométricos con el INVIAS y el IDU para los agregados finos, pasa tamiz No. 4 (4,75 mm),

mientras que los valores de la norma N.CMT de México difieren considerablemente a partir del tamiz No. 4 (4,75 mm).

En términos generales, los requerimientos granulométricos más similares se presentan entre las normas colombinas y la española, pues aunque varía un poco en lo solicitado para el agregado grueso, no presenta un desfase tan grande como el de la norma mexicana en los agregados finos.

Capítulo 4. Detallar el procedimiento de diseño y construcción de pavimentos con mezclas asfálticas porosas

Se denomina como pavimento, las distintas capas que soportaran el tráfico vehicular. Cuando una de estas capas, específicamente la carpeta de rodadura, está constituida por mezcla asfáltica porosa o drenante, se denomina como pavimento poroso o drenante, siendo esta la principal diferencia con los pavimentos convencionales constituidas con otras mezclas asfálticas. Los pavimentos convencionales son diseñados de tal manera que se genere una impermeabilización total de la superficie, con el fin de proteger las capas inferiores, sin embargo, esto ocasiona en épocas de lluvias, excesos en el caudal de escorrentía, así como el transporte de metales pesados, hidrocarburos, y otros elementos contaminantes (Trujillo & Quiroz, 2013; Castro M. , 2011).

Por la anterior, los pavimentos porosos se han convertido en una alternativa para el manejo de las aguas de escorrentía superficial generadas por las precipitaciones, a la vez que permiten mejorar la calidad del agua al retener materiales contaminantes. Sin embargo, su diseño y construcción debe estar condicionada a las recomendaciones existentes, así como al cumplimiento de determinados aspectos encaminados a mejorar su eficiencia (Trujillo & Quiroz, 2013).

4.1 Procedimiento de diseño de un pavimento poroso

Cuando se diseña un pavimento un pavimento poroso, este debe cumplir con una función estructural al mismo tiempo que permita manejar el agua de escorrentía generada por eventos de

precipitación, por tal razón, se deben considerar en el diseño criterios estructurales que aseguren que el pavimento ofrezca la suficiente resistencia, así como como criterios hidrológicos e hidráulicos que permitan el drenaje del agua, evitando que se presenten situaciones que puedan afectar la movilidad o la integridad estructural del pavimento (Castro M. , 2011).

Las metodologías de diseño, como la AASHTO 93, empleadas en los pavimentos convencionales, aunque pueden ser empleadas en los pavimentos porosos, tienen como limitante el no incluir los criterios hidrológicos e hidráulicos que caracterizan a este tipo de pavimentos permeables, por lo que a continuación se describirán los criterios y procedimientos descritos por el Manual de la organización conocida como CIRIA, ubicada en la ciudad de Londres, Reino Unido, quienes han desarrollado los denominados Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, el cual da especificaciones para el diseño de pavimentos asfálticos porosos. Se debe aclarar que en esta fase se presenta el diseño del pavimento con la suposición de que se ha diseñado previamente la mezcla asfáltica porosa acorde a lo indicado en los capítulos anteriores (CIRIA, 2015).

4.1.1 Diseño hidrológico e hidráulico. Es la primera fase de diseño del pavimento poroso. Como punto de partida se debe seleccionar las características del sistema de gestión del agua del pavimento, pues el CIRIA considera tres sistemas. El primero se denomina como Sistema A, se caracteriza por permitir el paso del agua por toda la estructura del pavimento hasta la subrasante, donde será infiltrada por el suelo. En la figura 15 se muestra este tipo de sistema (CIRIA, 2015; Carvajal & Quishpi, 2018).

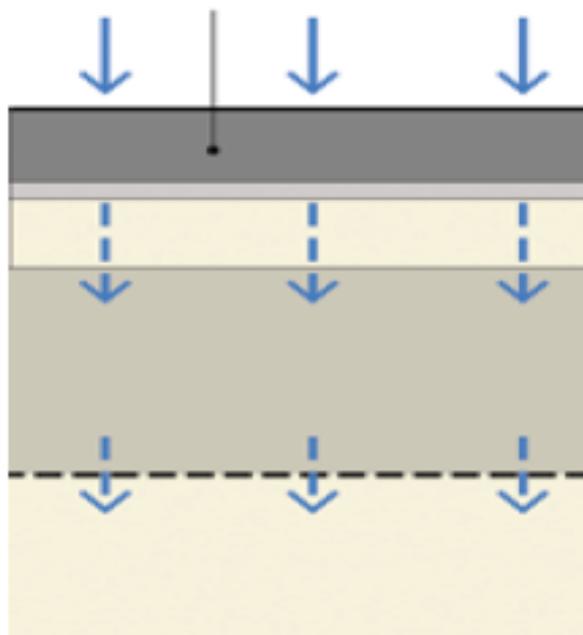


Figura 15. Sistema A para la gestión del agua

Fuente: Carvajal y Quishpi, 2018. *Diseño de pavimento asfáltico poroso para el aeropuerto Mariscal La Mar de Cuenca*. p. 38

El segundo se denomina como Sistema B, se caracteriza por permitir el transporte del agua excedente o que no es filtrada por la subrasante hacia un sistema de drenaje receptor. Esto se realiza mediante la incorporación de tuberías perforadas en las capas inferiores del pavimento. En la figura 16 se muestra este tipo de sistema (CIRIA, 2015; Carvajal & Quishpi, 2018).

El tercero se denomina como Sistema C, se caracteriza en que la subrasante es protegida totalmente por una membrana impermeable que impide la infiltración del agua, por lo que está es dirigida en su totalidad hacia los sistemas de drenajes complementarios. Este es el sistema más habitual y recomendado por el CIRIA, pues garantiza que la totalidad del agua se drene y se eviten estancamientos como puede ocurrir en los dos sistemas anteriores. En la figura 17 se muestra este tipo de sistema (CIRIA, 2015; Carvajal & Quishpi, 2018).

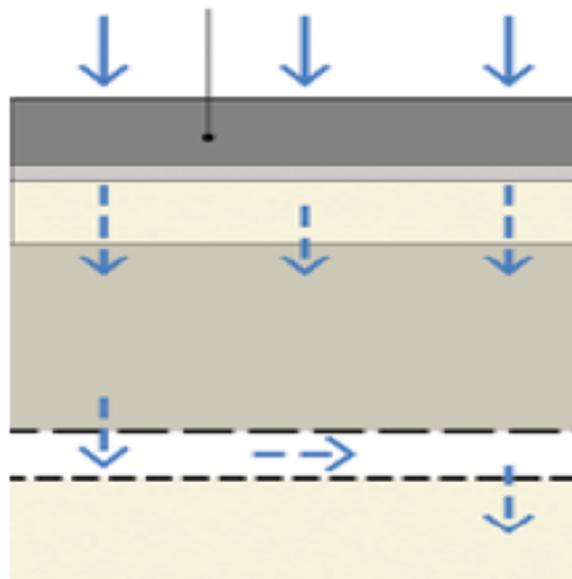


Figura 16. Sistema B para la gestión del agua

Fuente: Carvajal y Quishpi, 2018. *Diseño de pavimento asfáltico poroso para el aeropuerto Mariscal La Mar de Cuenca*. p. 39

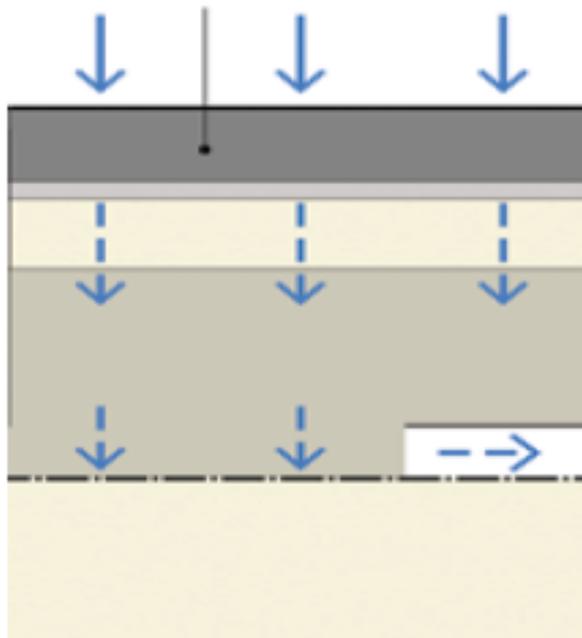


Figura 17. Sistema C para la gestión del agua

Fuente: Carvajal y Quishpi, 2018. *Diseño de pavimento asfáltico poroso para el aeropuerto Mariscal La Mar de Cuenca*. p. 39

Definido el sistema a emplear, se procede a calcular la profundidad máxima de almacenamiento del pavimento expresada en la ecuación 1, la cual corresponde al denominado reservorio, y que en las capas del pavimento es igual a la capa de sub-base. Para calcular esta profundidad es necesario realizar ensayos en el suelo donde se construirá el pavimento para determinar el coeficiente de infiltración. Así mismo, es necesario conocer la duración e intensidad de las lluvias de la zona, y el porcentaje de vacíos con aire de la mezcla asfáltica (CIRIA, 2015; Carvajal & Quishpi, 2018).

$$H_{m\acute{a}x} = \frac{d}{n} * [R * (I - k)] \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, $H_{m\acute{a}x}$ es la profundidad máxima de agua que puede ser almacenada en el pavimento; d e I , son la duración e intensidad de lluvias con el periodo de retorno requerido en la zona donde se construirá el pavimento; R , es la relación entre el área de drenaje y la zona de infiltración, se suele utilizar un valor de 1; n , es la porosidad de la mezcla asfáltica; y k , es el coeficiente de infiltración en m/h.

Es de resaltar que existen otros métodos de diseño que permiten determinar la capacidad de almacenamiento del reservorio, como el método de la curva envolvente, la metodología Chile, los métodos franceses, el método de lluvias, el método de los volúmenes, el método simplificado, entre otros, cada uno de los cuales establece un procedimiento para hallar este valor. En la investigación realizada por Trujillo y Quiroz, 2013, se describen detalladamente cada uno de estos métodos (Trujillo & Quiroz, 2013).

4.1.2 Diseño estructural. Realizados los cálculos del diseño hidrológico e hidráulico, el siguiente paso consiste en determinar los espesores de las demás capas que conforman el

pavimento. El manual del CIRIA, aconseja calcular el espesor de la carpeta asfáltica con los procedimientos convencionales descritos en la metodología AASHTO 93, no obstante, recomiendan unos valores mínimos para cada capa (CIRIA, 2015; Trujillo & Quiroz, 2013).

En el caso de la carpeta asfáltica porosa, se aconseja un valor mínimo de 10 cm, para garantizar el adecuado drenaje del agua. En el caso de la capa de base recomienda que sea conformada como una capa de grava con diámetro de 13 mm, y un espesor comprendido entre 25 y 50 cm; el material utilizado en esta capa debe cumplir con determinados parámetros, entre ellos el presentar una pérdida máxima por lavado del 0,5%, un índice mínimo de durabilidad de 35 y una pérdida por abrasión máxima del 10% para 100 revoluciones, mientras que la sub-base debe ser constituida de grava con diámetro entre 20 y 75 mm, y un espesor mínimo de 15 cm, sin embargo, el valor de la sub-base corresponde al obtenido en el diseño hidrológico o hidráulico, por lo que se escogerá el mayor valor entre los dos diseños (CIRIA, 2015; Trujillo & Quiroz, 2013).

También se sugiere conformar una capa entre la base y la sub-base que actúe como un filtro, conformándose con grava que ayude a transmitir las cargas, así como impedir que el agua suba a capas superiores a causa del fenómeno de capilaridad (CIRIA, 2015; Trujillo & Quiroz, 2013).

4.1.2.1 Método AASHTO 93. Esta metodología es utilizada con el fin de garantizar que la altura de cada una de las capas del pavimento sea adecuada y resistente a las cargas de diseño durante un período de tiempo determinado. Con el proceso aplicado se busca calcular el número

estructural o “SN”, por sus siglas en inglés, y en base a este número calcular los espesores de las capas: sub-base, base y carpeta de rodadura (González, 2017).

El número estructural indica la resistencia que requiere el pavimento para soportar las combinaciones de tráfico. En los pavimentos convencionales, para la carpeta de rodadura o carpeta asfáltica, se utiliza un coeficiente estructural comprendido entre 0,30 a 0,44 (dependiendo de la temperatura a la que estará expuesta el pavimento). Sin embargo, investigaciones realizadas en el Centro Nacional de Tecnología de Asfalto NCAT (por sus siglas en inglés), concluyeron que es más adecuado utilizar un coeficiente estructural igual o mayor a 0,15 (NCAT, 2012).

Para aplicar el método AASHTO 93 es necesario determinar varios valores, entre ellos el módulo de resiliencia y el CBR del suelo. Después se determina el periodo de diseño del pavimento acorde al tipo de vía y el índice de serviciabilidad (González, 2017).

Posteriormente se procede a realizar un análisis del tráfico, con el fin de determinar las cargas a las que estará sometida la estructura, condicionándose al tipo de vehículo que circulará por la vía: automóvil, camión de dos ejes, camión de más de dos ejes, motocicleta, entre otros. Con esto se hace un aproximado de la cantidad de ejes que transitaran por el pavimento (González, 2017).

El análisis del tráfico requiere establecer el Transito Medio Diario Anual (TPDA), la tasa de crecimiento anual del TPDA, la proyección del tránsito, obtener el factor de crecimiento (FC), la distribución bidireccional (Fd), el factor de distribución por carril (Fc), el Transito Equivalente (ESAL), calcular los Factores Equivalente de Carga (LEF), el Factor Camión (TF), hallar el número de ejes ESAL equivalentes para el carril de diseño, el coeficiente de drenaje (Cd), el

nivel de confianza, y finalmente determinar el número estructural “SN” para estimar los espesores de las capas. Esta es una descripción breve de todos los valores a considerar al utilizar el método AASHTO 93 (González, 2017).

En el Apéndice B se detalla un resumen de los aspectos principales a considerar para el diseño de una mezcla asfáltica porosa o drenante.

4.2 Procedimiento de construcción de un pavimento poroso

La planeación es un aspecto de vital importancia en la construcción de un pavimento poroso, pues las decisiones que se tomen así como la forma en que éstas sean aplicadas determinaran finalmente el desempeño del pavimento y su vida útil (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Para construir un pavimento poroso se deben seguir al igual que en el diseño, criterios que permitan garantizar las condiciones más adecuadas. Entre estos criterios se encuentran la erosión y el control de sedimentos para asegurar la estabilidad del terreno, la compactación del suelo donde se recomienda utilizar equipos ligeros para no generar una alta compactación pues esto podría disminuir la permeabilidad del suelo natural, aplicar sistemas de distribución del agua como desagües y tuberías, y finalmente aplicar de forma correcta los materiales que conformarán las distintas capas del pavimento (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

En el año 2009 el Centro de Aguas Pluviales de la Universidad de New Hampshire publicó un listado de las especificaciones de diseño para la construcción de pavimentos asfálticos porosos, además, de detallar el correcto procedimiento que se debe llevar a cabo. Para iniciar la

construcción recomiendan controlar los contaminantes que puedan causar impermeabilidad en el suelo por lo que sugieren desviarlos o depositarlos en lugares alejados al pavimento así como mantener cercas que obstruyan el paso de la escorrentía generada en las épocas de lluvia (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Cuando se han brindado las precauciones iniciales, se procede a realizar un control de la nivelación del terreno especialmente en los alineamientos y elevaciones previos a la construcción del pavimento, por lo que debe asegurarse que la superficie no presente puntos que en un futuro puedan convertirse en estancamientos de aguas lluvias (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Después se procede a preparar la subrasante para ello se utiliza la maquinaria correspondiente para tal fin. A diferencia de un pavimento convencional, en el poroso no se busca una compactación total de la subrasante, pues el terreno natural puede servir como filtro para el agua de escorrentía disminuyendo la cantidad de agua que se dirige a los desagües. En todo caso, el diseñador debe definir claramente si la subrasante contribuirá a la infiltración del agua, o por el contrario se decide trabajar la subrasante como una base impermeable para el asfalto poroso (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Terminada la subrasante se procede a instalar las capas porosas. La recomendación es colocar un geotextil sobre la superficie de la subrasante para evitar la contaminación de los materiales. Se sugiere que el geotextil sea no tejido en material sintético con una permeabilidad 10 veces mayor a la permeabilidad de la subrasante, traslapándose con un mínimo de 30 cm (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Ubicado el geotextil se inicia la conformación de la capa de sub-base, como se mencionó anteriormente el espesor de esta capa está determinada como el mayor valor obtenido en las fases de diseño. La sub-base debe ser compactada mediante un compactador estático de mínimo 10 toneladas, distribuyendo el material en capas de máximo 10 cm para garantizar la correcta distribución de las partículas y no afectar la relación de vacíos del material (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Finalizada la sub-base se procede a realizar la capa de filtro o transición, aunque su conformación es opcional, para después conformar propiamente la base de la estructura o pavimento empleando rodillo estático y vibro compactadores, se recomienda una compactación del 60% con el rodillo y de un 40% con el vibro compactador, o por lo menos un porcentaje cercano a este estándar (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Cuando se han conformado las capas inferiores del pavimento, el último paso consiste en la instalación de la mezcla asfáltica porosa. Para ello se inicia transportando el material a la obra preferiblemente en equipos de mediano tamaño que permitan realizar descargas suaves sin gran impacto asegurando, además, que la mezcla se encuentre protegida de agentes externos como el polvo, la lluvia y cambios de temperatura (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015)..

Transportado el material se procede a su colocación y nivelación, este proceso es realizado por pavimentadoras que garantizan que la mezcla sea esparcida en capas no superiores a 10 cm y con enrasado adecuado de la superficie del asfalto obteniendo una sección acorde a los diseños con una textura uniforme y correcta sin señales de huellas o rasgados. La pavimentadora deberá garantizar que la temperatura de aplicación de la mezcla se encuentre en el rango de 135 a

165°C, temperaturas inferiores o superiores pueden ocasionar defectos posteriores en la carpeta de rodadura (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

Cuando se ha aplicado la mezcla y se ha verificado su uniformidad se continúa con la compactación de la mezcla en cada una de las láminas o capas que se hayan conformado con la pavimentadora. El proceso de compactación se realiza con rodillos a una velocidad baja para que no se presenten desplazamientos ni acumulación de asfalto, y asegurar la integridad de los agregados (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015)..

Conformada totalmente la capa asfáltica se realizan revisiones de su superficie garantizando que ésta no presente manchas, lesiones o desniveles. Finalmente, los acabados consisten en eliminar el material suelto en la superficie, y pintar líneas de 10 cm de ancho para demarcar los carriles o las zonas de parqueo (Trujillo & Quiroz, 2013; González, 2017; CIRIA, 2015).

4.3 Mantenimiento de pavimentos porosos

El mantenimiento de los pavimentos porosos debe considerarse como un aspecto esencial para su adecuado desempeño y para que este pueda tener una vida de servicio acorde a lo esperado en su diseño. Para realizar el mantenimiento se recomienda utilizar una aspiradora que permita absorber los sedimentos que se encuentren en la superficie del pavimento y que puedan obstruir el paso del agua. Debe evitarse la utilización de lavados con agua a presión o barridos con aire comprimido pues se puede generar una afectación significativa de los materiales de la mezcla asfáltica porosa (Castro M. , 2011).

Aunque se espera que con el pasar del tiempo la capacidad de infiltración del pavimento poroso disminuya por la acumulación de materiales, la tasa siempre debe ser mayor a la requerida por la intensidad de precipitación. Se recomienda un mantenimiento por lo menos anual del sistema (Castro M. , 2011).

Investigaciones llevadas a cabo por Gómez Gonzáles et al, 2010, indican que los pavimentos porosos tienden a colmatarse muy rápidamente (8 meses y medio), por lo que recomiendan un mantenimiento promedio de 2 meses y medio. Este puede considerarse como un criterio valido para aquellas zonas donde existen grandes movimientos de sedimentos (Trujillo & Quiroz, 2013).

4.4 Ejemplos de estructura de pavimentos porosos

Si bien el procedimiento de diseño y construcción detallado anteriormente es uno de los más confiables y usados, muchos pavimentos han sido construidos bajo otros parámetros y consideraciones, basados en las experiencias locales, o a consecuencia de análisis individuales sustentados bajo determinadas teorías o suposiciones. Por lo anterior, es común encontrar en la literatura correspondiente a pavimentos porosos, distintas representaciones esquemáticas de la estructura de los pavimentos porosos. (Muñoz & Ruiz, 1999).

En la figura 18 se observa la estructura de pavimento poroso recomendada por el CIRIA, 2015. Sin embargo, en esta representación no se consideró el empleo de la capa de material filtrante entre la base granular y la sub-base granular o reservorio.

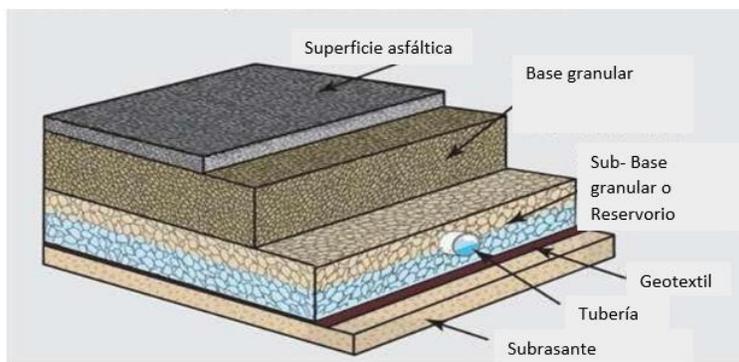


Figura 18. Estructura pavimento poroso recomendada por CIRIA

Fuente: Velasco & Camargo, 2020. *Mejoramiento de mezclas asfálticas porosas a través de la incorporación de fibras de nylon y polipropileno*. p. 19

Otra estructura de pavimento poroso utilizada, es la recomendada por la Asociación de Pavimento de Asfalto del Estado de Arkansas, en los Estados Unidos. En la figura 19 se observa esta estructura. Se evidencia en la figura, que esta estructura solo permite el paso del agua a través de la mezcla asfáltica porosa para ser transportada hacia el sistema de drenaje adyacente. No se permite el paso a través de las capas inferiores del pavimento, pues se construyen con materiales impermeables. Lo recomendado por esta asociación difiere considerablemente de lo sugerido por el CIRIA, sin embargo, para su elección deben considerarse criterios hidrológicos, constructivos y de presupuesto (CIRIA, 2015; Ayala & Juárez, 2010).

En el año 1999, en la ruta Temuco – Cholchol, en Chile, la empresa contratista Becker-Bitumix se une a la empresa proveedora Probisa, para la construcción de un kilómetro de vía empleando una mezcla asfáltica porosa, la cual era desconocida en este país hasta esa fecha. Se propusieron distintas alternativas para la estructura del pavimento, pero, al final fue seleccionada la indicada en la figura 20. Se puede observar que presenta similitudes con lo recomendado por la Asociación de Pavimento de Asfalto de Arkansas, ya que solo permite el paso del agua a través de la carpeta de rodadura conformada con mezcla asfáltica porosa o drenante, el resto de

capas son impermeabilizadas, en este caso la capa asfáltica densa impide el paso del agua hacia las capas granulares (Campos, 2008).

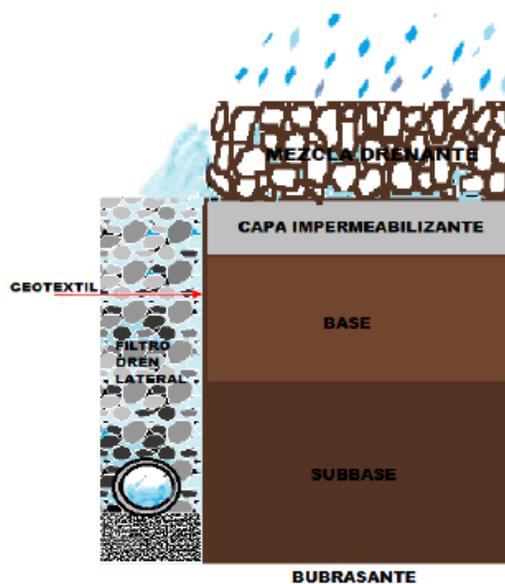


Figura 19. Estructura de pavimento poroso recomendada por la Asociación de Pavimento de Asfalto de Arkansas
Fuente: Ayala y Juárez, 2010. *Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en El Salvador*. p. 153



Figura 20. Estructura de pavimento poroso construida en el tramo experimental ubicado en la ruta Temuco-Cholchol, en Chile

Fuente: Campos, 2008. *Seguimiento y comparación del comportamiento de tramos con mezcla drenante, según zona geográfica y condiciones locales*. p. 57

Otra estructura de pavimento ampliamente considerada, es la sugerida por la Asociación Nacional de Pavimento de Asfalto, NAPA, por sus siglas en inglés, la cual se visualiza en la figura 21. Esta estructura al igual que la recomendada por el CIRIA, se caracteriza por permitir el paso del agua en las distintas capas que conforman el pavimento, siendo la subrasante protegida con un geotextil. La mayor diferencia radica en que esta asociación indica que no es necesario compactar la capa de subrasante, debido a que esto ocasiona una disminución del potencial filtrante del suelo natural (Sharma, Satyender, & Sharma, 2017).

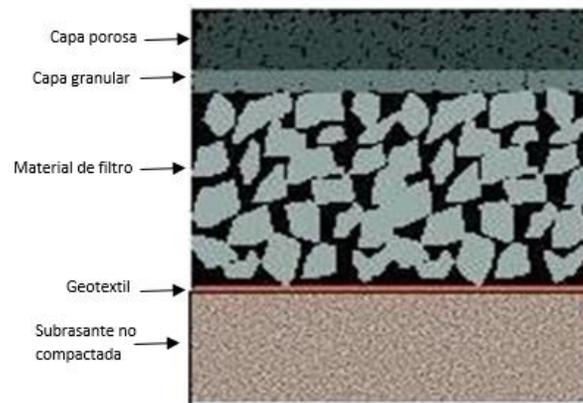


Figura 21. Estructura de pavimento poroso recomendado por la NAPA

Fuente: Sharma, Satyender y Sharma, 2017. *Laboratory Performance of Porous Asphalt Pavement*. p. 2

Capítulo 5. Describir los procesos implementados para el manejo de aguas de escorrentía con pavimentos porosos

Las mezclas asfálticas porosas, así como los pavimentos donde son utilizados, son considerados hoy en día como una alternativa confiable para realizar un adecuado manejo de las aguas de escorrentía, y con ello disminuir los fenómenos que se presentan por una inadecuada gestión del agua (Castro M. , 2011).

Entre los fenómenos más comunes presentados en pavimentos convencionales está el llamado hidropneumático, el cual se origina por la presencia de agua en la superficie del pavimento, lo que reduce el contacto de las llantas de los vehículos con la carpeta asfáltica de rodadura, conllevando a deslizamientos, y en ocasiones vuelcos de los vehículos. Este fenómeno se agrava si se conduce a altas velocidades. En la figura 22 se observa la separación causada por la lámina de agua sobre el pavimento (López, 2013).



Figura 22. Representación del fenómeno de hidropneumático

Fuente: López, 2013. *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes*. p. 7

Otro fenómeno causado por una incorrecta gestión del agua es el efecto llamado “Isla de Calor”, el cual se presenta por la impermeabilización de grandes áreas, especialmente urbanas, pues al reducirse el drenaje natural, se reduce la capacidad del terreno para amortiguar las altas temperaturas, generando microclimas que disminuyen la comodidad de los habitantes (López, 2013).

Los anteriores fenómenos son ejemplos del impacto que ocasiona el desarrollo urbano y la creación de nuevas vías, pues la impermeabilización de superficies cada vez mayores, tiende a generar afectaciones en los ciclos hidrológicos.

El ciclo hidrológico, también conocido como el ciclo del agua, representa los procesos de movimiento a los cuales se ve sometido el agua. En condiciones naturales el ciclo se inicia con la precipitación del agua, la cual es primero interceptada por la vegetación para después caer al suelo. Cuando el suelo ha sido totalmente saturado se generan escorrentías superficiales que son transportadas hacia ríos, lagos, humedales y los océanos. Un gran porcentaje del agua es infiltrada por el suelo hasta llegar a los acuíferos subterráneos. El ciclo se reinicia con la evaporación del agua tanto por temperatura como por transpiración de las plantas para dar origen a nuevas precipitaciones (Trujillo & Quiroz, 2013).

Lo anterior representa el ciclo del agua en un estado natural, es decir, sin afectaciones considerables de las actividades humanas. Sin embargo, actualmente existen grandes zonas donde el desarrollo urbanístico ha modificado completamente el comportamiento del agua, por lo que el proceso ha sido denominado como ciclo hidrológico urbano. Al igual que el anterior ciclo, se inicia con la precipitación del agua, pero, esta vez el agua es retenida por los tejados de viviendas, edificios y por la infraestructura vial de las ciudades. Esto conlleva a que exista una muy poca infiltración del agua al suelo, por lo que se genera de forma casi inmediata escorrentías

superficiales que son encausadas por los sistemas de alcantarillado y drenaje, hasta ser transportadas hasta los puntos de desagüe, por lo que no existe una alimentación de los acuíferos subterráneos de las ciudades (Trujillo & Quiroz, 2013; Castro M. , 2011).

La alteración de los ciclos naturales del agua tiende a generar grandes afectaciones en las zonas urbanas manifestándose principalmente en las inundaciones, pues los diseños y las configuraciones convencionales de los sistemas de drenaje buscan eliminar el agua en el menor tiempo posible encausando el agua hacia determinados puntos y por medio de canales y demás estructuras, sin embargo, las precipitaciones anuales cada vez son más concentradas e intensas, es decir, cae la misma cantidad de agua, pero, en un periodo de tiempo menor. Esto dificulta la evacuación de las aguas de escorrentía, y por tanto se presentan las inundaciones que son consideradas como comunes en muchas ciudades (Trujillo & Quiroz, 2013).

El efecto se agrava debido a que las superficies que impermeabilizan las ciudades como tejados, pavimentos, concretos, entre otros, generan una alta contaminación en el agua de escorrentía conllevando a una degradación de las aguas receptoras: ríos, quebradas, humedales, entre otros. Entre los contaminantes que pueden ser transportados por el agua se encuentran bacterias, virus, aceites, grasas, metales, residuos orgánicos, pesticidas, hidrocarburos, entre otros elementos. Todos ellos generan un deterioro en la calidad del agua que llega a los grandes cuerpos de agua en la mayoría de los casos sin ningún tratamiento previo (Castro M. , 2011).

Lo anterior ha conllevado a la búsqueda de estrategias que permitan hacer frente a los constantes cambios que se presentan en los sistemas urbanos y permitan favorecer el manejo de las aguas de escorrentía, es así como en la actualidad se han implementado técnicas referentes al drenaje urbano y que en conjunto han sido denominadas como Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, del cual se hizo mención en el capítulo anterior, aunque en países como

Estados Unidos, son conocidos como Mejores Prácticas de Control (MPC). A continuación se expondrán algunas de las técnicas pertenecientes a este sistema.

5.1 Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, buscan facilitar el manejo de las aguas de escorrentía de tal manera que se presenten mayores beneficios en su utilización, ya que los sistemas convencionales simplemente buscan eliminar el agua al ser transportada en su totalidad hacia sitios específicos. Con los SUDS se obtiene una mejor administración, calidad y servicio del agua (Carvajal & Quishpi, 2018).

Como ya se mencionó en el capítulo 4, los SUDS fueron propuestos en un manual por la organización conocida como CIRIA, en la ciudad Londres. Posteriormente, los sistemas propuestos por esta organización fueron tomados por otras ciudades adaptándolos a sus condiciones locales. La ciudad de Bogotá, fue una de las primeras en plasmar un documento técnico basado en las indicaciones del CIRIA, aunque manteniendo muchos de los criterios originales (Secretaría Distrital del Ambiente de Bogotá, 2011; CIRIA, 2015).

Los pavimentos porosos están incluidos dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, sin embargo, los pavimentos porosos pueden ser empleados tanto en ambientes urbanos como no urbanos, como vías rurales, intermunicipales, entre otras.

Aunque el pavimento poroso puede por sí solo prestar una adecuada gestión del agua, generalmente está concebido para integrarse con otros sistemas que maximicen sus beneficios. Estos sistemas incluyen la construcción de estructuras de bajo impacto ambiental que ayuden a

disminuir las zonas impermeabilizadas, ayudando a controlar las escorrentías superficiales. Entre los sistemas más importantes que se integran con los pavimentos permeables se encuentran las trincheras, franjas de pasto, canales vegetados, jardines de bio retención, estanques de infiltración y estanques de detención. A continuación, se detallan algunas características de cada sistema (Castro M. , 2011).

5.1.1 Trincheras. Consisten en excavaciones de poca profundidad donde se aplica un relleno con grava generalmente gruesa, generando un almacenamiento temporal del agua para su evacuación por percolación o mediante tuberías. En el proceso de filtración se proporciona una mejora considerable en la calidad del agua. En figura 23 se ilustra la forma de una trinchera (CIRIA, 2015; Secretaría Distrital del Ambiente de Bogotá, 2011).



Figura 23. Trinchera

Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 23

5.1.2 Franjas de pasto. Consiste en vegetación densa con poca pendiente que se encargan de filtrar el agua que pasa por el sistema de drenaje. Sirven como pre tratamiento del agua y

suelen ser usadas en conjunto con otros sistemas como las trincheras. En la figura 24 se observa una forma de uso de las franjas de pasto (CIRIA, 2015; Secretaría Distrital del Ambiente de Bogotá, 2011).



Figura 24. Uso conjunto de trincheras y franjas de pasto

Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 23

5.1.3 Canales vegetados. Se construyen longitudinalmente con el pavimento para amortiguar, almacenar y transportar el agua de lluvia. El agua que es absorbida por el pavimento es conducida hacia el canal para agilizar su evacuación. En la figura 25 se observa un canal vegetado (CIRIA, 2015).



Figura 25. Canales vegetados

Fuente: Iagua.es, 2020. Obtenido en: <https://www.iagua.es/blogs/ignacio-andres-domnenech/gestion-alternativa-agua-lluvia-mediante-sistemas-drenaje-sostenible>

5.1.4 Jardines de bio retención. Se encuentran ubicados en zonas de baja profundidad donde el agua es fácilmente retenida por su topografía, lo que sumado a la vegetación existente permite un tratamiento del agua que va ser infiltrada en el suelo. En la figura 26 se muestra un tipo de estos jardines ubicados en zonas urbanas (CIRIA, 2015).



Figura 26. Jardines de bio retención

Fuente: Iagua.es, 2020. Obtenido en: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-valbuena-villalonga/rehabilitacion-redes-alcantarillado-mediante-tecnicas-drenaje>

5.1.5 Estanques de infiltración. Consisten en excavaciones realizadas para almacenar el agua y evacuarla por procesos de percolación hacia los acuíferos subterráneos. Suelen construirse en zonas verdes, parques y patios, como se observa en la figura 27. Su principal limitación es que el nivel freático del terreno debe encontrarse por debajo del punto más profundo del estanque (CIRIA, 2015).



Figura 27. Estanque de infiltración

Fuente: Aggregate, 2020. Obtenido en: <http://www.aggregate.com>

5.1.6 Estanques de detención. A diferencia del tanque de infiltración, con este estanque se busca que el agua sea retenida por un mayor tiempo con el fin de brindar un uso recreativo o por lo menos paisajístico, como el mostrado en la figura 28. La sedimentación que se genera en este tipo de estanque mejora la calidad del agua, y permite el desarrollo de la vegetación circundante (CIRIA, 2015).



Figura 28. Estanque de detención o retención

Fuente: Warnonline, 2020. Obtenido en: http://www.warnonline.org/espanol/retentionpond_span.html

5.2 Implicaciones del uso de pavimentos porosos

Los pavimentos porosos representan una nueva alternativa para la pavimentación de vías, especialmente en zonas urbanas donde el desarrollo urbanístico requiere de nuevos métodos para manejar las aguas lluvias, sin embargo, es necesario considerar las implicaciones que conlleva su utilización, pues, aunque representan el obtener grandes ventajas y beneficios también pueden generar desventajas en algunos casos, al ser usado en parqueaderos, parques y zonas de poca afluencia de vehículos.

5.2.1 Ventajas. Los pavimentos porosos presentan una resistencia y duración similar a los pavimentos convencionales por lo que pueden circular cualquier tipo de vehículos sobre su superficie. Además, se integran completamente con los sistemas de drenaje existentes convirtiéndose de esta manera en una cadena de drenaje sostenible, integrando procesos de infiltración, captación, transporte y almacenamiento, lo que posibilita la reutilización de las aguas pluviales por lo menos para usos no potables, como la agricultura. (Castro M. , 2011).

Las ventajas ambientales son considerables con este tipo de pavimentos, algunas de ellas son el permitir que los suelos retengan humedad por tiempos más prolongados, reducir el riesgo de inundaciones, evitar el transporte de desechos por lo cual disminuye la contaminación del agua, facilitar la infiltración del agua en el suelo para de esta manera alimentar los recursos de agua subterránea, permitir el crecimiento de vegetación pues como se mencionó anteriormente este sistema permite integrarse con sistemas donde se prioriza el uso de árboles y plantas (Castro M. , 2011).

En cuanto a ventajas sociales, los pavimentos porosos mantienen su superficie más limpia que cualquier otro tipo de pavimento, por lo que no presentan charcos o láminas de aceite o cualquier otro material que pueda representar un riesgo para los conductores. Además, reducen el ruido producido por los neumáticos ya que los poros o vacíos del pavimento absorben la energía del sonido (Castro M. , 2011).

En el aspecto económico los pavimentos porosos permiten reducir el gasto generado por las afectaciones de inundaciones, encharcamientos, entre otros, al reducir el volumen de agua que circula por la red de drenaje, además, de reducir el costo del tratamiento de estas aguas (Castro M. , 2011).

5.2.2 Desventajas. El principal inconveniente que tienen los pavimentos porosos se debe a la colmatación, donde los sedimentos que se generan en la superficie paulatinamente van obstruyendo los vacíos o poros que permiten que circule el agua. Si no se realiza un mantenimiento periódico la colmatación puede ser tan alta que puede generarse una obstrucción muy alta que impida que el sistema funcione correctamente (Castro, Rodríguez, Rodríguez, & Ballester, 2005).

Otra desventaja es que si no se presenta una adecuada infiltración del agua en el terreno o está no logra ser evacuada eficazmente, el agua retenida en el pavimento puede aumentar su temperatura y propiciar procesos anaeróbicos que aumenten su contaminación. Si esto ocurre por periodos de tiempo considerable podrían generarse contaminantes que al iniciar las temporadas de lluvia sean finalmente depositados en los receptores naturales de agua (González, 2017).

En cuanto al aspecto social, la mayor desventaja es concerniente a la poca difusión de este tipo de pavimentos, pues no existen referentes a gran escala que permitan demostrar su eficacia. En lo económico, los pavimentos porosos son unitariamente más costosos que los convencionales ya que requieren de un personal más especializado, además, de exigir estrictamente un mantenimiento para asegurar su funcionamiento, mientras que en los convencionales estos mantenimientos son realizados con fines de reparcho (González, 2017).

Capítulo 6. Analizar las experiencias de la implementación de mezclas asfálticas porosas en Colombia y en otros países

Las mezclas asfálticas porosas en la actualidad son consideradas como una alternativa viable para hacer frente a los constantes cambios medioambientales que se vienen presentando a consecuencia de la contaminación global, y que han ocasionado alteraciones cada vez mayores en la distribución de las lluvias anuales, tanto en frecuencia como en intensidad.

Es así como se han realizado algunas aplicaciones de este tipo de mezclas y de pavimentos, especialmente en áreas de estacionamiento y carreteras de bajo volumen. Adicionalmente se han realizado diseños para evaluar las ventajas que presentarían al ser utilizadas en senderos, caminos peatonales, complejos deportivos, carriles para bicicletas, áreas urbanas o industriales, pavimentos de puentes, entre otros (Arias, 2018).

6.1 Aplicaciones de mezclas asfálticas porosas en Colombia

Como se mostró en los capítulos iniciales, Colombia cuenta con una normativa que permite emplear mezclas asfálticas porosas. En el capítulo 2 se expusieron varias investigaciones desarrolladas en el país sobre estas mezclas, sin embargo, dichos estudios solo consistieron en comprobar las propiedades físicas y mecánicas de estas mezclas.

Otros estudios, se concentraron en proponer diseños de pavimentos porosos para un determinado lugar. Uno de ellos fue el realizado por Castro, 2011, quien aplicó una metodología de diseño recomendada para pavimentos donde se empleen mezclas asfálticas porosas. Proyectó

el pavimento para el patio trasero y el antejardín de una vivienda de un sector de la ciudad de Bogotá, llamado Guaymaral, el cual se encuentra muy cerca al río Bogotá y algunos humedales. En el diseño tuvo en cuenta el tipo de suelo presente, además, de realizar los respectivos diseños hidrológicos, hidráulicos y estructurales. De esta manera propuso una alternativa viable para manejar las aguas lluvias de esta vivienda (Castro M. , 2011).

Otra propuesta de diseño fue efectuada por Trujillo y Quiroz, 2013, quienes se concentraron en demostrar las ventajas que representa la implementación de pavimentos donde sean utilizadas mezclas asfálticas porosas, realizando comparativos donde demostraron que las desventajas existentes de estos sistemas radica en las pocas experiencias realizadas, y que los pavimentos convencionales representan una afectación mucho mayor para los sistemas urbanos (Trujillo & Quiroz, 2013).

Las anteriores propuestas de diseño fueron presentadas como parte de procesos de investigación llevadas por jóvenes universitarios, sin embargo, en Colombia no existen aplicaciones considerables de este tipo de pavimentos con mezcla asfáltica porosas. En contraste, en el país se han implementado sistemas de pavimentación, pero, empleando concreto o adoquines porosos, especialmente en parques y pequeños estacionamientos.

En el trabajo desarrollado por López Moreno, 2013, se hace mención de dos tramos de pavimento construidos en Colombia con mezcla asfáltica porosa o drenante. El primero de ellos ubicados en la Autopista del Café “Dosquebradas – Pereira y Club de Tiro” con una longitud de 2800 m, y el segundo en la Concesión Vial de los Andes Coviandes con una longitud de 4900 m. Ambos tramos están a cargo del Instituto Nacional de Vías INVIAS. Sin embargo, analizando los detalles técnicos del proyecto, se muestra que la mezcla asfáltica fue elaborada según lo establecido en el Artículo 452: Mezcla discontinua en caliente para capa de rodadura

(microaglomerado en caliente), por lo que realmente no corresponde a un pavimento poroso (López, 2013).

6.2 Aplicaciones de mezclas asfálticas porosas en el mundo

A diferencia de Colombia, y como se comentó en otros capítulos, existen países donde si se han llevado a cabo aplicaciones de las mezclas asfálticas porosas. Países como Estados Unidos, Reino Unido, España, Bélgica, Holanda, Australia, Japón, Chile, entre otros, han construido grandes superficies con este tipo de mezcla. Solo en el caso de Bélgica y Holanda, para el año 1998 se calculaban entre ambos países un área aproximada de 2 millones de metros cuadrados (Fonseca, Serment, & Villalobos, s.f).

En Latino América, aunque no se estiman las mismas superficies que en los países europeos, se ha logrado desarrollar aplicaciones de pavimentos porosos, siendo México el país con mayor número de construcciones de este tipo.

Una de estas aplicaciones fue realizada en el estado de Chiapas, en México donde se construyó un pavimento con mezclas asfáltica porosa para la plaza principal de la ciudad de Soslayo perteneciente a este estado del país Azteca. En la figura 29 se puede observar el pavimento, el cual fue pintado superficialmente para ofrecer un atractivo visual a los visitantes.



Figura 29. Pavimento poroso en la ciudad de Soslayo, Chiapas, México
Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 71

Otra aplicación fue realizada en un estacionamiento de vehículos perteneciente a la empresa Schnyder Electric en el estado de Tlaxcala, México. Esta empresa se dedica a invertir en sistemas digitales de energía y automatización así como a invertir en proyectos y soluciones donde se busque mejorar la eficiencia de los sistemas de manejo del agua que brinden mayor sostenibilidad. En la figura 30 se observa el estado actual del estacionamiento construido.



Figura 30. Pavimento poroso en la planta Schnyder Electric en Tlaxcala, México
Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 71

Otra empresa privada que invirtió en la construcción de un pavimento asfáltico poroso fue el Hotel Intercontinental de Zopapan en Jalisco, México. Se construyó el pavimento en el tramo vial ubicado en las inmediaciones del hotel, esto con el fin de dar una solución eficaz al manejo de las precipitaciones, las cuales son muy constantes en esta zona del país. En la figura 31 se observa el estado actual del pavimento.



Figura 31. Pavimento poroso en el hotel Intercontinental de Zapopan en Jalisco, México
Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 72

En Canadá también se han realizado inversiones referentes al desarrollo de mezclas asfálticas porosas, especialmente destinadas a su uso en estacionamientos y parqueaderos, en la figura 32 se observa uno de estos estacionamientos ubicado en la ciudad de Ontario, Canadá, el cual facilita el drenaje del agua en las temporadas de deshielo.



Figura 32. Estacionamiento en Ontario, Canadá

Fuente: Castro, 2011. *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. p. 72

Conclusiones

La información recopilada en la presente monografía permitió concluir lo siguiente:

La descripción de los materiales utilizados en las mezclas asfálticas porosas muestra que los materiales necesarios para la elaboración de este tipo de mezclas corresponden a los mismos que se utilizan en una mezcla asfáltica convencional, sin embargo, estos materiales deben ajustarse a los valores exigidos por la norma para cada una de las características consideradas para poder ser empleados. Además, no existe una similitud completa con ninguno de los requerimientos exigidos para otro tipo de mezcla asfáltica, por tanto, la mezcla asfáltica porosa debe ser elaborada con materiales que cumplan estrictamente lo solicitado para su conformación. El material bituminoso a emplear en la mezcla debe ser cemento asfáltico modificado con polímeros.

La identificación de las propiedades físicas y mecánicas de las mezclas asfálticas porosas indica que las propiedades más importantes a considerar en este tipo de mezclas son: el contenido de vacíos con aire, la permeabilidad, resistencia al desgaste y la adhesividad, las cuales en conjunto garantizan la elaboración de una mezcla adecuada. Además, se deben verificar determinados aspectos para garantizar la calidad de la mezcla asfáltica porosa en el pavimento, como la compactación, el espesor, la planicidad o lisura, la textura, la resistencia al deslizamiento, la regularidad superficial (rugosidad) y la segregación térmica.

Los diversos estudios realizados hasta la fecha, indican que el contenido óptimo de asfalto se encuentra comprendido entre 4,5% a 6,5% respecto al peso seco de los agregados, incluido el llenante mineral, pues permiten obtener cumplir con lo exigido para cada una de las propiedades

exigidas para las mezclas asfálticas porosas: vacíos con aire (20 a 25%), la permeabilidad (paso de 100 ml de agua en máximo 15 segundos), resistencia al desgaste (máx. 25%) y la adhesividad (máx. 40%).

En Colombia existen dos normas donde se reglamenta el uso de mezclas asfáltica porosas y de los requerimientos que deben cumplir para ser utilizadas, estas son el artículo 453: Mezcla drenante, del INVIAS, y la Sección 512: Mezcla asfáltica drenante en caliente. Así mismo, en países como España y México también se cuenta con normas para emplear estas mezclas, en el caso de España, se cuenta la Sección 543: Mezclas bituminosas para capas de rodadura mezclas drenantes y discontinuas, del Boletín Oficial del Estado BOE, de este país. En México por su parte, está la norma N.CMT.4.04/17: Materiales para pavimentos, de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes de los Estados Unidos Mexicanos. Comparando estas normas, se determinó que las mayores similitudes se dan entre las normas del INVIAS y del IDU, aunque presentan algunas diferencias en cuanto a los valores requeridos para algunas características del agregado pétreo.

Las normas colombianas exigen requerimientos tanto para los agregados como para el llenante mineral, mientras que en España no se solicita calcular ningún valor para el agregado fino, y en México no se exige ningún valor para el llenante mineral, sin embargo, la norma mexicana es la más similar a las normas colombianas en cuanto a los requerimientos para los agregados. Por otra parte, en lo referente a los requerimientos granulométricos, la norma del INVIAS y del IDU exigen los mismos valores, siendo la más similar la norma BOE de España, y presentando mayor diferencia con la norma mexicana, sobre todo en los porcentajes requeridos por cada tamiz en los agregados finos. De manera general, se concluye que ninguna norma es igual a las demás.

El procedimiento necesario para realizar un correcto diseño de pavimentos donde se empleen mezclas asfálticas porosas debe contemplar criterios adicionales a los estructurales. En un pavimento poroso se debe tener en cuenta criterios hidrológicos e hidráulicos para obtener los espesores de las capas del pavimento, especialmente de la sub-base, también llamada reservorio, pues estos cálculos permitirán que el pavimento actúe como un sistema de drenaje eficaz.

En cuanto a la construcción del pavimento, esta debe ser efectuada siguiendo las recomendaciones dadas por las normas y aquellas que han surgido de experiencias en la implementación de este tipo de mezclas.

El mantenimiento de los pavimentos porosos es un aspecto esencial para su correcto funcionamiento, se deben realizar revisiones periódicas de todo el sistema, además, de limpiezas periódicas que permitan eliminar los sedimentos presentes, evitando así los procesos de colmatación y obstrucción de los vacíos de la carpeta asfáltica.

Las mezclas asfálticas porosas son consideradas dentro de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, por lo que es considerada una alternativa para el manejo de aguas de escorrentía, siendo potencializada su eficacia si se utiliza en conjunto con otros sistemas, especialmente trincheras, franjas de pasto, canales vegetados, jardines de bio retención, estanques de infiltración y estanques de detención.

En Colombia no existen implementaciones de pavimentos con mezclas asfálticas porosas, aunque sean realizado diseños donde se ha demostrado las ventajas que representaría, no se ha obtenido el apoyo económico para construir por lo menos un área ya sea de estacionamiento, parqueadero o de vía. Sin embargo, en otros países sobre todo europeos se ha logrado construir

considerables superficies con este tipo de mezcla. En el caso de Latino América, México es uno de los países donde mayores aplicaciones se han realizado, obteniendo excelentes resultados.

Con el desarrollo de esta monografía se concluye que las mezclas asfálticas porosas si son una alternativa viable para el manejo de las aguas de esorrentía, pues estas mezclas han sido utilizadas desde hace varias décadas en muchos países del mundo, sin embargo, en Colombia, no se les ha dado la misma importancia, en parte debido a un desconocimiento de las normas, y por otra parte, a preferencias por parte de diseñadores y constructores de seguir implementando mezclas asfálticas convencionales, omitiendo alternativas viables como las mezclas asfálticas porosas, las cuales pueden mitigar el impacto que ocasionan las inundaciones y los problemas propios del desarrollo urbano, además, de reducir el impacto ambiental que comúnmente ocasiona la construcción de vías.

Referencias

- Arias, S. (2018). *Análisis comparativo de diversas especificaciones actuales sobre las mezclas asfálticas drenantes y su aplicación en las normativas colombianas*. Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Arrieta, V. (2013). *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias, a partir de la mezcla de cemento asfáltico AC 60-70 con licomont BS-100 para diferentes niveles de precipitación*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Medellín, Colombia.
- Artículo 400 del INVIAS. (2007). *Disposiciones generales para la ejecución de riegos de imprimación, liga y curado, tratamientos superficiales, sellos de arena asfalto, lechadas asfálticas, mezclas asfálticas en frío y en caliente y reciclado de pavimentos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Artículo 453 del INVIAS. (2013). *Mezcla drenante*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Artículo 453 Invias. (2013). *Mezcla drenante*. Instituto Nacional de Vías.
- Ayala, M., & Juárez, I. (2010). *Diseño de mezcla drenante con asfalto modificado disponible en El Salvador*. Tesis de pregrado, Universidad de El Salvador, Ciudad Universitaria, El Salvador.
- Ballard, B. e. (2015). *The Suds Manual*. CIRIA.
- Booth, D. B., & Leavitt, J. (1999). Field evaluation of permeable pavement systems for improved stormwater management. *APA Journal*, 314-325.
- Briggs, J. F. (2006). *Performance assessment of porous asphalt for stormwater treatment*. Master of science, University New Hampshire, New Hampshire, United States.
- Cahill, T. H., Adams, M., & Marm, C. (2005). Stormwater Management with porous pavements. *Government Engineering*, 14-19.
- Campos, J. (2008). *Seguimiento y comparación del comportamiento de tramos con mezcla drenante, según zona geográfica y condiciones locales*. Tesis de pregrado, Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Cárdenas, G., Albiter, A., & Jaimes, J. (2017). Pavimentos permeables. Una aproximación convergente en la construcción de vialidades urbanas y en la preservación del recurso agua. *Espacio del divulgador*, 24(2), 173-180.

- Carvajal, A., & Quishpi, O. (2018). *Diseño de pavimento asfáltico poroso para el aeropuerto Mariscal La Mar de Cuenca*. Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Castro, D., Rodríguez, J., Rodríguez, J., & Ballester, F. (2005). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS)*. Asociación INTERCIENCIA, Caracas, Venezuela.
- Castro, M. (2011). *Pavimentos permeables como alternativa de drenaje urbano*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- CIRIA. (2015). *The Suds Manual*.
- Cuentas, J. (2019). *Análisis y diseño de pavimento flexible poroso en laboratorio como propuesta de solución a la drenabilidad de aguas pluviales en la ciudad de Puno*. Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Puno, Perú.
- Cuervo, S. (2018). *Pavimentos. Análisis de la influencia de su selección al hacer ciudad*. Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Fonseca, C., Serment, V., & Villalobos, R. (s.f). *Dosificación de mezclas asfálticas abiertas y drenantes empleando el método de ensayo cántabro de pérdidas por desgaste*.
- Frigio, f. et al. (2013). Improved durability of recycled porous asphalt. *Construction and Building Materials*, 48, 755-763.
- Garnica, P. e. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Publicación técnica, Instituto Mexicano del Transporte, Queretaro, México.
- González, J. (2017). *Evaluación técnica, ambiental y económica de pavimentos asfálticos drenantes en Colombia*. Tesis de pregrado, Universidad EIA, Envigado, Colombia.
- Heystraeten, G. V., & Moraux, C. (1990). Ten years' experience of porous asphalt in Belgium. *Transportation Research Record 1265*, 34-40.
- INVIAS. (2012). *Capítulo 4. Pavimentos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Isenring, T., Köster, H., & Scazziga, I. (s.f). Experiences with porous asphalt in Switzerland. *Transportation Research Record 1265*.
- López, C. (2013). *Comportamiento mecánico de mezclas asfálticas drenantes*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Lyons, K., & Putman, B. (2013). Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 49, 772-780.
- Meneses, J., & Páez, D. (2017). *Mezcla asfáltica permeable como parte de la estructura de pavimento a partir del uso y modificación de una mezcla drenante aplicado a vías*

- urbanas*. Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo de Chile. (1996). *Técnicas alternativas para soluciones de aguas lluvias en sectores urbanos. Guía de diseño*. Guía de diseño, Santiago de Chile, Chile.
- Mora, G., & Pérez, G. (1998). Comparación de mezclas asfálticas drenantes fabricadas con asfalto modificado y sin modificar. *Revista de la facultad de ingeniería*.
- Muñoz, G., & Ruiz, C. (1999). Metodología de diseño y colocación de mezclas drenantes. *10° Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto*. España.
- NCAT. (2012). *PHASE IV NCAT PAVEMENT TEST TRACK FINDINGS*.
- Poulikakos et al. (2006). *Mechanical properties of porous asphalt, recommendations for standartization*. Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Resarch, Dübendorf, Switzerland.
- Pratico, F. et al. (2019). An experimental method to desing porous asphalts to account for surface requeriments. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1-14.
- Rico, A., Téllez, R., & Garnica, P. (1998). *Pavimentos flexibles. Problemática, metodologías de diseño y tendencias*. Publicación técnica, Instituto Mexicano del Transporte, Queretaro, México.
- Ruiz, A., Alberola, R., Pérez, F., & Sánchez, B. (s.f.). *Porous Asphalt Mixtures In Spain*. Transportation Research Record 1265, Madrid, Spain.
- Sección 512 del IDU. (2011). *Mezcla asfáltica drenante en caliente*. Especificación técnica, Instituto de Desarrollo Urbano, Bogotá, Colombia.
- Sección 543 del BOE. (2011). *543 Mezclas bituminosas para capas de rodadura. Mezclas drenantes y discontinuas*. Boletín Oficial del Estado, Madrid, España.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2017). *Materiales para pavimentos*. Especificación técnica, Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México, Ciudad de México, México.
- Secretaría Distrital del Ambiente de Bogotá. (2011). *Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible*. Documento técnico de soporte, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., Bogotá, Colombia.
- Shadman, M., & Ziari, H. (2017). Laboratory evaluation of fatigue life characteristics of polymer modified porous asphalt: A dissipated energy approach. *Construction and Building Materials*, 138, 434-440.

- Sharma, A., Satyender, & Sharma, D. K. (2017). *Laboratory performance of porous asphalt pavement*. Indian Institute of Technology Roorkee, India.
- Trujillo, A., & Quiroz, D. (2013). *Pavimentos porosos utilizados como sistemas alternativos al drenaje urbano*. Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Velasco, J. F. (2019). *Mejoramiento de mezclas asfálticas porosas a través de la incorporación de fibras de nylon y polipropileno*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Yalcinkaya, C. (s.f.). *Porous Asphalt*.
- Zhang, Z. et al. (2020). State of the art of porous asphalt pavement: Experience and considerations of mixture design. *Construction and Building Materials*, 262, 1-28.

Apéndices

Apéndice A. Niveles de tránsito en Colombia

1. Niveles de tránsito según lo especificado en el Artículo 100: Ámbito de aplicación, término y definiciones del Instituto Nacional de Vías INVIAS:

NT1: Nivel de tránsito uno. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a $0,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño.

NT2: Nivel de tránsito dos. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre $0,5 \times 10^6$ y $5,0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño.

NT3: Nivel de tránsito tres. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es superior a $5,0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño.

2. Niveles de tránsito según el Instituto de Desarrollo Urbano IDU, especificaciones del Capítulo 1. Aspectos generales.

T0: Nivel de tránsito cero. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es inferior a $0,2 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

T1: Nivel de tránsito uno. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre $0,2 \times 10^6$ y $0,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

T2: Nivel de tránsito dos. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre $0,5 \times 10^6$ y $1,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

T3: Nivel de tránsito tres. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre $1,5 \times 10^6$ y $3,0 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

T4: Nivel de tránsito cuatro. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir oscila entre $3,0 \times 10^6$ y $7,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

T5: Nivel de tránsito cinco. Vías en las que el tránsito de diseño de las obras por construir es mayor a $7,5 \times 10^6$ ejes equivalentes de 80 KN en el periodo de diseño en el carril de diseño.

Apéndice B. Aspectos a considerar para el diseño de mezclas asfálticas porosas o drenantes.

A continuación se presentan cada uno de los aspectos que deben ser considerados para el diseño de una mezcla asfáltica porosa:

1. Materiales.

La mezcla asfáltica porosa debe estar constituida de: material bituminoso, agregados pétreos (gruesos y finos) y llenante mineral. Estos materiales deben cumplir con los requerimientos indicados en el Artículo 453: Mezcla drenante, establecido por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

El *material bituminoso* debe corresponder al denominado cemento asfáltico modificado con polímeros. Este debe ser utilizado en la mezcla en un contenido mínimo de 4,5% respecto al peso seco de los agregados, incluido el llenante mineral.

Los agregados pétreos se dividen en 2 tipos: gruesos y finos. Los agregados gruesos corresponden al material que es retenido en el tamiz No.4 (4,75 mm). Mientras que los agregados finos son aquellos comprendidos entre el tamiz No.4 (4,75 mm) y retenidos en el tamiz No.200 (0,075 mm).

El llenante mineral o también llamado polvo mineral o filler, es el material que pasa por el tamiz No.200 (0,075 mm).

La mezcla asfáltica porosa debe estar constituida por un 68-85% de agregado grueso, 12-15% de agregado fino y de un 3 a 7% de llenante mineral. Esta es la proporción recomendada para este tipo de mezclas, en la tabla 16 se muestra la franja granulométrica que debe ser cumplida:

Tabla 22.

Franja granulométrica mezcla asfáltica porosa

Tamiz		% Pasa
mm	Pulg	
19	3/4"	100
12,5	1/2"	70-100
9,5	3/8"	50-75
4,75	No.4	15-32
2	No.10	9-20
0,425	No.40	5-12
0,075	No.200	3-7

Nota: Artículo 453: Mezcla drenante, INVIAS.

2. Ensayos a realizar a la mezcla asfáltica porosa

Cuando se han definido los porcentajes de cada uno de los materiales anteriores, se hace necesario determinar que proporción del material bituminoso es el más adecuado. Para determinar esto se deben realizar los siguientes ensayos y cumplir con cada uno de los parámetros especificados, la descripción de cada ensayo se encuentra el capítulo 2.

Con cada una de las proporciones a analizar se realizan briquetas o probetas que deben ser sometidas a ensayos para determinar las siguientes propiedades:

- Resistencia al desgaste: Debe obtenerse de acuerdo a la norma I.N.V. E-760. El valor de desgaste no debe ser superior a 25%.
- Contenido de vacíos con aire: Se calcula a partir de lo expresado en la I.N.V. E-736. El contenido de vacíos con aire debe estar comprendido entre un 20 a 25%.
- Permeabilidad: Debe ser calculada a partir de un ensayo empírico se mide el tiempo en el que 100 ml de agua traspasan la probeta. Este tiempo debe ser inferior a quince segundos (15 s).
- Adhesividad: Se efectúa el procedimiento descrito en la norma I.N.V. E-760, pero, debe ser realizado con probetas sumergidas en agua previamente durante 24 horas. El valor máximo de desgaste es de 40%.

3. Evaluación de la mezcla asfáltica porosa en el pavimento

Para garantizar el adecuado desempeño de la mezcla asfáltica porosa, se debe evaluar los siguientes aspectos:

- Compactación: Debe ser mínimo del 95% respecto a la densidad de diseño.
- Espesor: No debe ser inferior al espesor de diseño.
- Planicidad o lisura: La superficie no deberá presentar irregularidades mayores a diez milímetros (10 mm).
- Textura: Se debe aplicar la norma I.N.V. E-791. La profundidad promedio debe ser mayor a quince décimas de milímetro.

- Resistencia al deslizamiento: Se realiza de acuerdo a la I.N.V. E-792. El valor mínimo admisible del coeficiente de resistencia al deslizamiento es de 0,55 para zonas de tangente, y 0,60 para las demás zonas.
- Regularidad superficial (rugosidad): Se calcula a partir de la I.N.V. E-794: Cálculo del Índice Internacional de Rugosidad (IRI) de pavimentos de carreteras. Deben cumplirse los valores indicados en la siguiente tabla:

Porcentaje de hectómetros	Pavimentos de construcción nueva y rehabilitados en espesor >100 mm	Pavimentos rehabilitados en espesor ≤100 mm
40	1,4	1,9
80	2	2,5
100	2,5	3

- Segregación térmica: Se debe tomar el respectivo registro fotográfico infrarrojo, el cual debe ser anexado en el registro de cada proyecto, para en caso de presentarse afectaciones en el pavimento, determinar si la temperatura de colocación de la mezcla pudo ocasionar el daño.