



PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR EL CONTENIDO ÓPTIMO DE LIGANTE EN MEZCLAS DRENANTES

Juan José Rosales Valda^a, Augusto Jugo Burguera^b

^a Docente Titular de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Sucre, Bolivia, juan_jose_rosval@hotmail.com

^b Instituto Venezolano del Asfalto (INVEAS), Caracas, Venezuela. augustojugo11@gmail.com

Trabajo presentado al Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto (CILA)

RESUMEN

Este trabajo contiene una propuesta para la determinación del Contenido Óptimo de Asfalto (COA) de una Mezcla Asfáltica Drenante (MAD). En el desarrollo de una investigación para evaluar la factibilidad de elaborar MAD con agregados locales de Sucre, Bolivia, se encontró que la literatura consultada –en referencia a este tipo de mezclas- poco o nada indican sobre los criterios de selección del contenido óptimo de ligante. Las especificaciones se refieren a las propiedades que debe cumplir la mezcla, en términos de permeabilidad y resistencia.

Las MAD requieren, como condición primaria, tener elevado contenido de vacíos que haga la mezcla altamente permeable o drenante, lo que se evalúa mediante propiedades volumétricas y un ensayo de permeabilidad. Así mismo, se requiere que la mezcla tenga una durabilidad y resistencia adecuada para soportar las cargas del tráfico y efecto del medio ambiente; estas propiedades se evalúan mediante un ensayo especial, el método Cántabro.

Las especificaciones consultadas indican valores límites, que debe cumplir la mezcla en estos ensayos, para que la misma se considere aceptable de acuerdo a criterios empíricos de comportamiento, sin embargo, no indican un procedimiento para determinar el % óptimo de ligante, aspecto que se considera un vacío en la normativa. De aquí la significancia de este trabajo.

Palabras Clave: mezclas drenantes, diseño de mezclas drenantes, selección de contenido de ligante.

ABSTRACT

This work contains a proposal for the determination of the Optimal Asphalt Content (COA) of a Draining Asphalt Mix (MAD). In the development of an investigation, to evaluate the feasibility of elaborating MAD with local aggregates from Sucre, Bolivia, it was found that the consulted literature -in reference to this type of mixtures- indicates little or nothing about the selection criteria of the optimal binder content. The specifications refer to the properties that the mixture must meet, in terms of permeability and resistance.

MAD require, as a primary condition, a high void content that makes the mixture highly permeable or draining, which is evaluated by volumetric properties and a permeability tests. Likewise, the mixture is required to have adequate durability and resistance to withstand the loads of traffic and the effect of the environment; These properties are evaluated by means of a special test, the Cantabrian method.

The specifications consulted indicate limit values that the mixture must meet in these tests, so that it is considered acceptable according to empirical performance criteria, however, they do not indicate a procedure to determine the optimal % of binder, an aspect that is considered a gap in the regulations. Hence the significance of this work.

Keywords: draining mixes, draining mix design, selection of binder content.

Introducción

Los problemas más frecuentes en tiempos de lluvia, que se producen en un pavimento convencional húmedo son la pérdida de adherencia entre el neumático y la superficie. La pérdida de adherencia deja al conductor con poco control de su vehículo impidiendo maniobrar en forma segura. Si a esto agregamos el agua que proyectan los vehículos a su paso y la “neblina” formada, atrás de los vehículos de mayor tamaño, hacen que la conducción en días lluviosos sea por demás peligrosa.

El uso de MAD, proporcionan un mejor drenaje del agua a través de la capa de rodadura y no por sobre la misma, para ello debe diseñarse la granulometría que se ajuste a lo requerido por este tipo de mezclas, que den como resultado una mezcla permeable, pero a su vez resistente al tráfico y medioambiente.

Con la finalidad de determinar el COA de la MAD, empleando agregados locales en Sucre, Bolivia se adelantó este trabajo –de laboratorio- empleando dos tipos de ligante asfáltico (uno polimerizado y otro estándar) y tres distintos tipos de material llenante (filler). Sin embargo, al momento de determinar un contenido óptimo de ligante, no se encontró un procedimiento establecido, lo que dio origen al presente trabajo.

Antecedentes

Las MAD iniciaron su uso en los Estados Unidos de América cerca de los años 40’s del siglo pasado como tratamiento superficial, utilizando espesores de aproximadamente 2,5 cm. El objetivo principal era recuperar la textura de las capas de rodadura que se encontraban en estado liso. Con el tiempo se descubrió la capacidad de absorber el ruido generado por el paso de los vehículos y la capacidad de captar las aguas de lluvias, eliminándolas de la capa de rodadura lo que produjo un incremento en su uso (Bardesi A., 1999).

Con el paso de los años, gracias a la experiencia y la investigación, el uso de estas mezclas se ha extendido, adaptándose a diversas condiciones climáticas.

En el año 1979, se iniciaron en el Laboratorio de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Santander, España, estudios encaminados a la caracterización de las mezclas bituminosas de granulometría abierta para su empleo en capas de rodadura. (Pérez Jimenez., 1995).

En países de Latinoamérica como Colombia se ha contemplado dentro de su Normativa el diseño de MAD, desarrollando una Normativa por el Instituto Nacional de Vías (INVÍAS).

Composición granulométrica de la MAD

En las MAD el porcentaje de vacíos es alto (entre 20% - 25%) para permitir que filtre el agua con rapidez. Para poder obtener este elevado contenido de vacíos, es necesario modificar la proporción agregado grueso y agregado fino de tal forma que, en general, el contenido de arena suele ser inferior al 20%. Debido a ello, la capacidad de resistencia de la mezcla no puede basarse en la cohesión, puesto que faltaría mortero, sino en el rozamiento interno. Esta falta de cohesión hace que la mezcla sea crítica ante ciertos esfuerzos del tráfico, especialmente de tipo tangencial, que inducen disgregación.

En este trabajo se elaboraron Mezclas Asfálticas Drenantes (MAD), variando el contenido de cemento asfáltico convencional C.A. 85 – 100, cemento asfáltico polimerizado P.M.B. 60 – 85 e incorporando filler natural, filler cemento Portland, y filler cal hidratada, estos en 3; 5 y 7 % en peso de los áridos. En este trabajo se adoptan las siguientes abreviaturas para las MAD elaboradas:

Tabla 1. Tipos de Mezcla Asfáltica Drenante elaboradas

ABREVIATURA	MAD	CEMENTO ASFÁLTICO (VARIANDO 4.0%; 4.5% Y 5.0%)	FILLER (VARIANDO 3%;5% Y 7%)
MADCAC – FN	Cemento asfáltico convencional – filler natural	Porcentaje de cemento asfáltico convencional 85/100	Porcentaje de filler natural
MADCAP – FN	Cemento asfáltico polimerizado – filler natural	Porcentaje de cemento asfáltico polimerizado 60/85	Porcentaje de filler natural
MADCAP - FCP	Cemento asfáltico polimerizado – filler cemento Portland	Porcentaje de cemento asfáltico polimerizado 60/85	Porcentaje de filler Cemento Portland
MADCAP - FCH	Cemento asfáltico polimerizado – filler cal hidratada	Porcentaje de cemento asfáltico polimerizado 60/85	Porcentaje de filler Cal Hidratada

Se elaboraron mezclas variando el porcentaje de filler en la cantidad requerida para: 3%; 5% y 7% de material pasante del tamiz #200, obteniéndose tres composiciones granulométricas que se muestran en la siguiente Tablas 2.

Tabla 2. Composición de la granulometría para 3%, 5% y 7% filler

TAMIZ ASTM	TAMIZ (MM)	3% FILLER	5% FILLER	7% FILLER	BANDA GRANULOMÉTRICA	
		% PASANTE			INF.	SUP.
1"	25	100.0	100.0	100.0	100	100
3/4"	19.0	100.0	100.0	100.0	100	100
1/2"	12.5	78.9	78.9	78.9	70	100
3/8"	9.5	58.9	58.9	58.9	50	75
N° 4	4.75	26.8	26.9	26.9	15	32
N° 10	2.00	14.9	15.8	16.6	9	20
N° 40	0.425	8.4	9.9	11.3	5	12
N° 200	0.075	3.0	5.0	7.0	3	7

La composición de la MAD obtenida en laboratorio, se ajustó a los límites de la especificación granulométrica de la normativa colombiana INVIAS, con los siguientes porcentajes:

- 80% de agregado grueso, 17% de fino, y un 3% de filler.
- 80% de agregado grueso, 15% de fino, y un 5% de filler.
- 80% de agregado grueso, 13% de fino, y un 7% de filler.

La siguiente tabla 3, indica los requisitos que deben cumplir las MAD de acuerdo a la Normativa INVIAS, en % de vacíos, permeabilidad, desgaste Cántabro en estado seco y húmedo:

Tabla 3. Criterios de diseño de Mezclas Asfálticas Drenantes

CRITERIOS DE DISEÑO	REQUISITOS
Vacíos con aire	$20\% \leq \text{vacíos} \leq 25\%$
Permeabilidad	100 ml en máx. 15 s.
Desgaste Cántabro en estado seco	$\leq 25\%$
Desgaste Cántabro en estado húmedo	$\leq 40\%$

Análisis de resultados de la MAD con asfalto convencional y filler natural (MADCAC – FN)

En la siguiente tabla se muestra los valores promedio de los resultados obtenidos en laboratorio de los diferentes ensayos a los cuales fueron sometidos los especímenes.

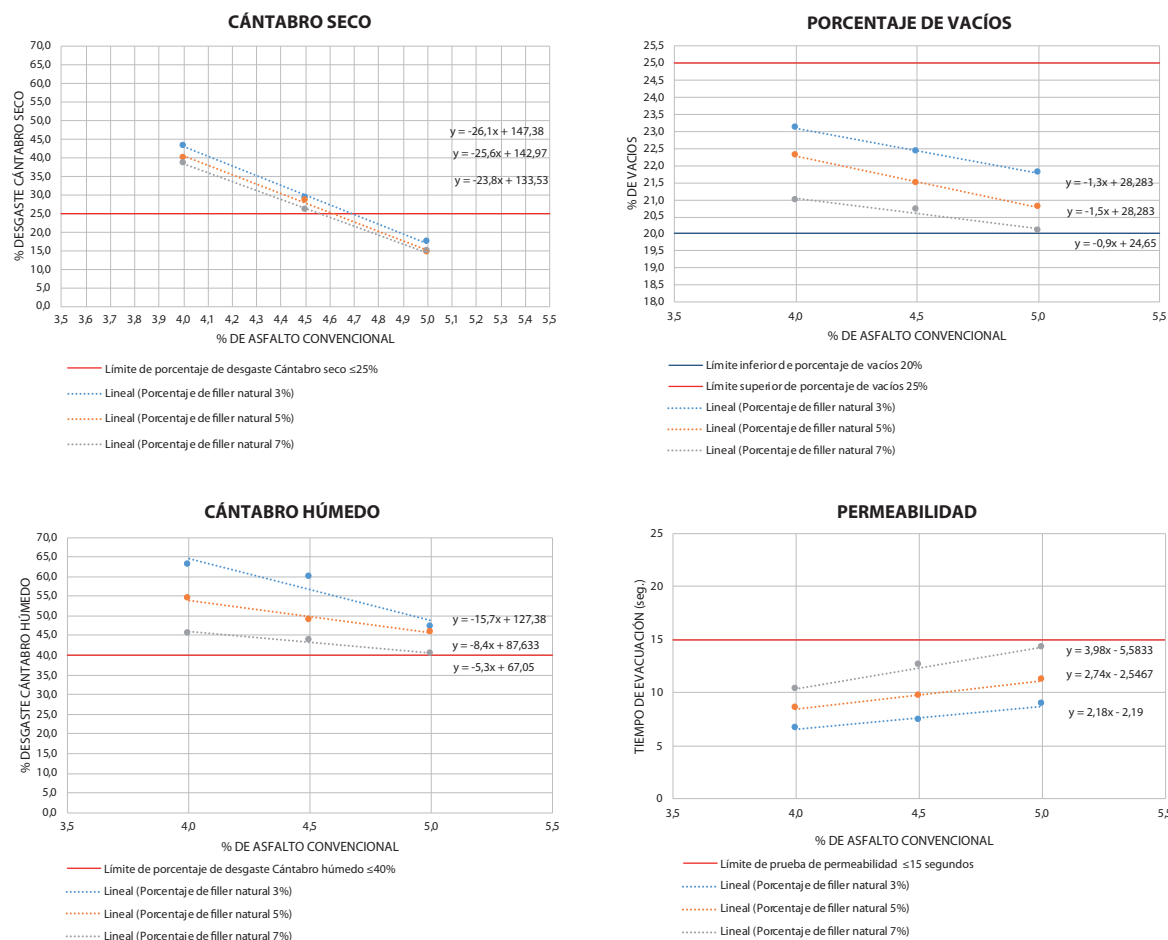
Tabla 4. Resumen de resultados de laboratorio (MADCAC – FN)

% CEMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL	ENSAYO	PORCENTAJE DE FILLER NATURAL (%)		
		3	5	7
		RESULTADO PROMEDIO		
4.0	Ensayo Cántabro en estado seco $\leq 25\%$	43.4 X	40.1 X	38.6 X
4.5		29.1 X	28.7 X	25.9 X
5.0		17.3	14.5	14.8
4.0	Ensayo Cántabro en estado húmedo $\leq 40\%$	63.0 X	54.4 X	45.5 X
4.5		59.9 X	49.1 X	43.9 X
5.0		47.3 X	46.0 X	40.2 X
4.0	Porcentaje de vacíos con aire entre 20 y 25 (%)	23.1	22.3	21.0
4.5		22.4	21.5	20.7
5.0		21.8	20.8	20.1
4.0	Permeabilidad $\leq 15(s.)$	6.65	8.45	10.23
4.5		7.38	9.71	12.54
5.0		8.83	11.19	14.21

NOTA. – Los valores con X, no cumplen con la Normativa

4.1 Pérdida por desgaste en estado seco, húmedo, % vacíos y permeabilidad (MADCAC – FN)

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio mostrados en la tabla 4, se prepararon las siguientes figuras para 4,0%; 4.5% y 5.0% de cemento asfáltico convencional y 3%; 5% y 7% filler natural, con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados:



Figuras 1.; 2.; 3. y 4. Resultados de ensayos (MADCAC – FN)

De acuerdo a los resultados del ensayo de desgaste Cántabro húmedo se observa que ningún porcentaje de cemento asfáltico convencional y filler natural cumple los requisitos establecidos por la Normativa INVIAS, superando el valor permitido de 40%. Solo en caso de 5% de ligante con 7 % de filler el valor de 40,2 % se acerca al máximo de 40 %. Como se observa en la figura incrementando el % de ligante y/o el % de filler se cumple este requerimiento, sin embargo, la permeabilidad y el % de vacíos quedan fuera de especificación.

Este ejemplo ilustra, claramente, el conflicto que se presenta -en numerosos casos- en la selección de un % de ligante óptimo (COA), ya que las 2 propiedades fundamentales de las MAD tienen comportamientos opuestos, como queda evidenciado.

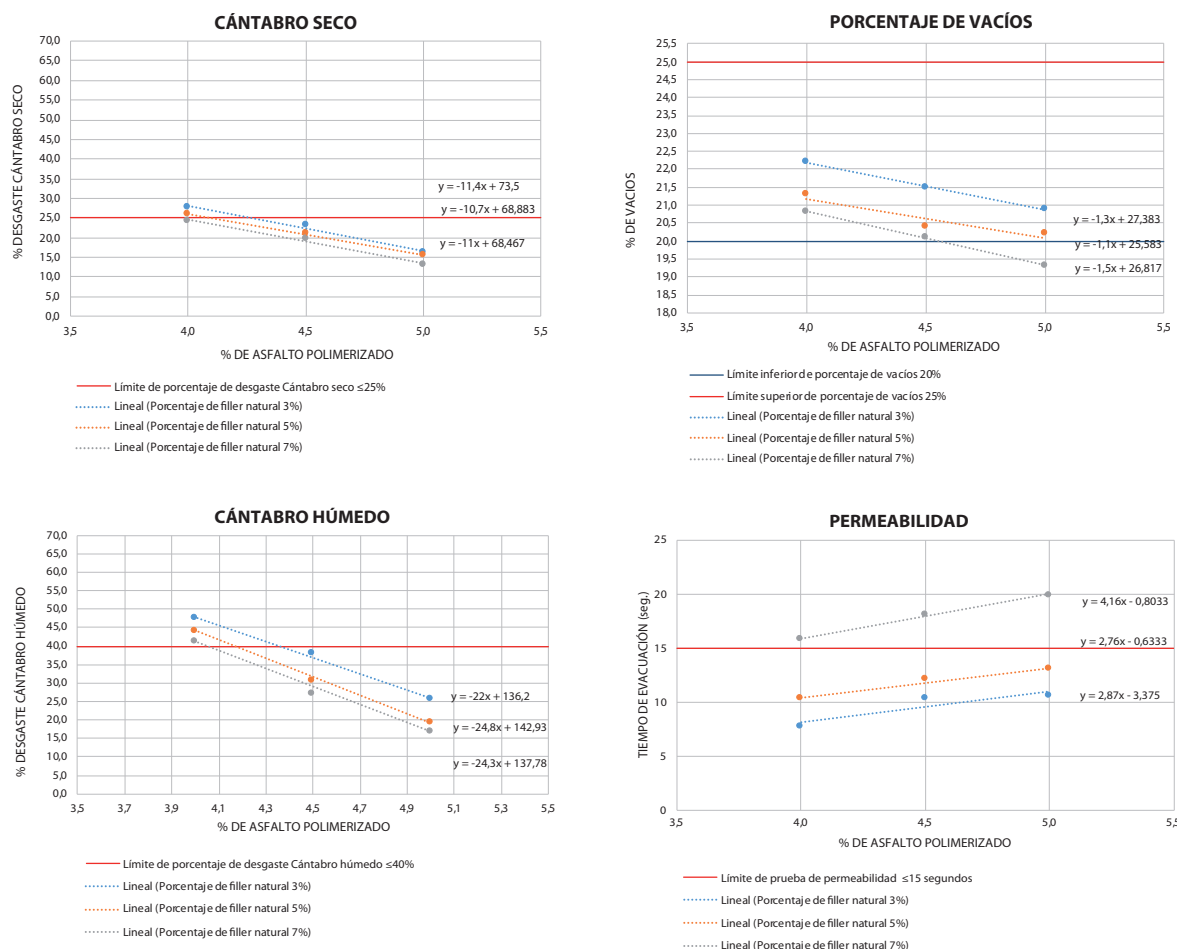
Respecto al ensayo Cántabro seco para 4.0% y 4.5% de cemento asfáltico convencional y 3%; 5% y 7% de filler natural, no se cumple el valor requerido, superando 25%, sin embargo, cumple el desgaste en estado seco para 5.0% de asfalto convencional y 3%; 5% y 7% de filler natural.

Para todos los porcentajes de cemento asfáltico convencional y filler natural los porcentajes de vacíos con aire están dentro de los límites permitidos (20% a 25%) y la permeabilidad es menor a 15 segundos, lo cual evidencia que los vacíos de aire se encuentran interconectados. Sin embargo, con valores altos de ligante y filler estas propiedades se aproximan al límite de la especificación.

Por razones de espacio y para simplificar la presentación, los resultados de los otros diseños se presentan solo en forma gráfica.

4.2 Análisis de resultados con cemento asfáltico polimerizado y filler natural (MADCAP-FN)

Con los resultados obtenidos, se prepararon las figuras para 4,0%; 4,5% y 5,0% de cemento asfáltico polimerizado y 3%; 5% y 7% filler natural, en forma similar a los antes mostrados.



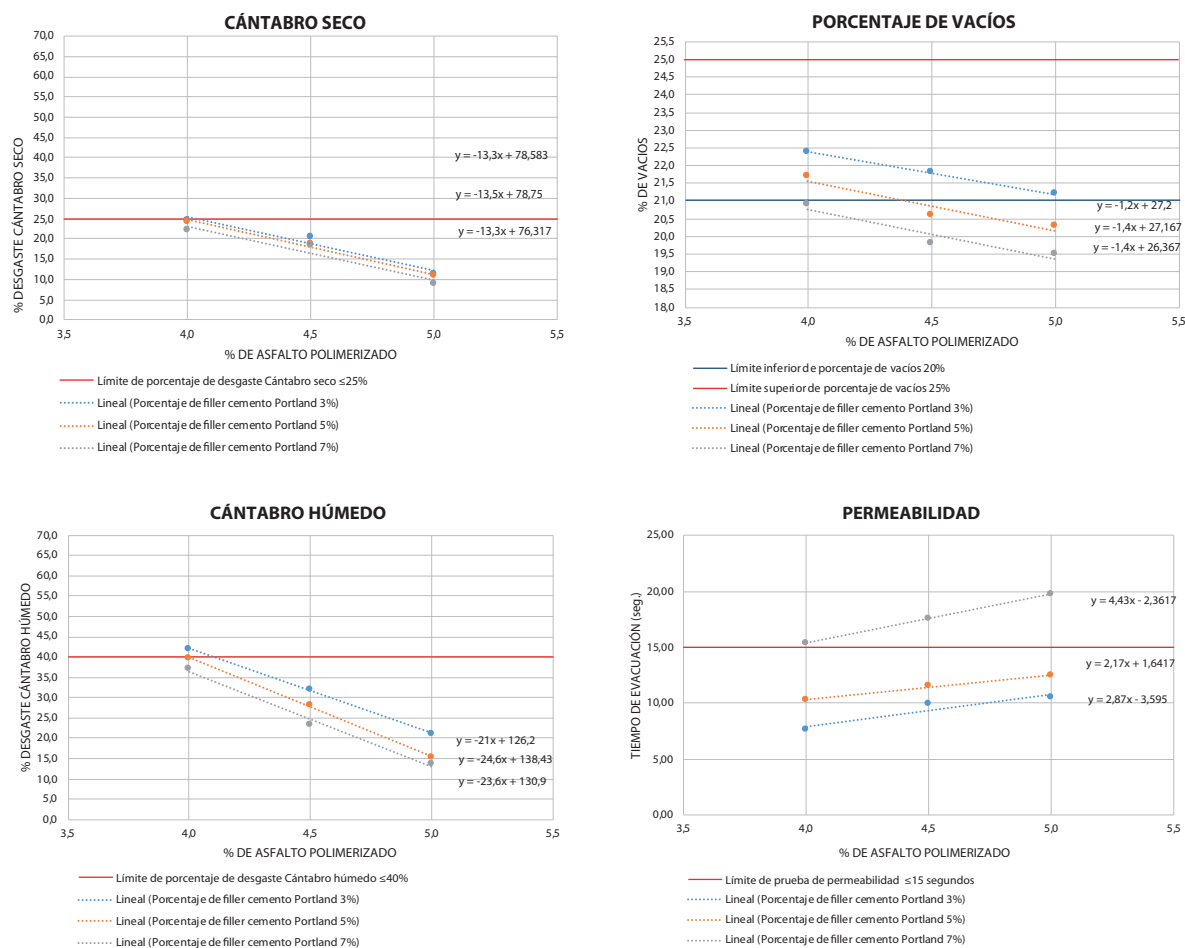
Figuras 5.; 6.; 7. y 8. Resultados de (MADCAP-FN)

Como se esperaba y se observa en las gráficas a medida que se aumenta filler natural en 3%; 5% y 7% el desgaste Cántabro seco y húmedo tiende a bajar.

Si se reduce el porcentaje de cemento asfáltico polimerizado, las briquetas se ven expuestas a mayores desgastes en estado húmedo y estado seco, pero aumenta el porcentaje de vacíos y la permeabilidad.

4.3 Análisis de resultados con asfalto polimerizado y filler cemento Portland (MADCAP – FCP)

Las siguientes figuras corresponden a 4,0%; 4,5% y 5,0% de cemento asfáltico polimerizado y 3%; 5% y 7% filler cemento Portland:



Figuras 9.; 10.; 11. y 12. Resultados (MADCAP – FCP)

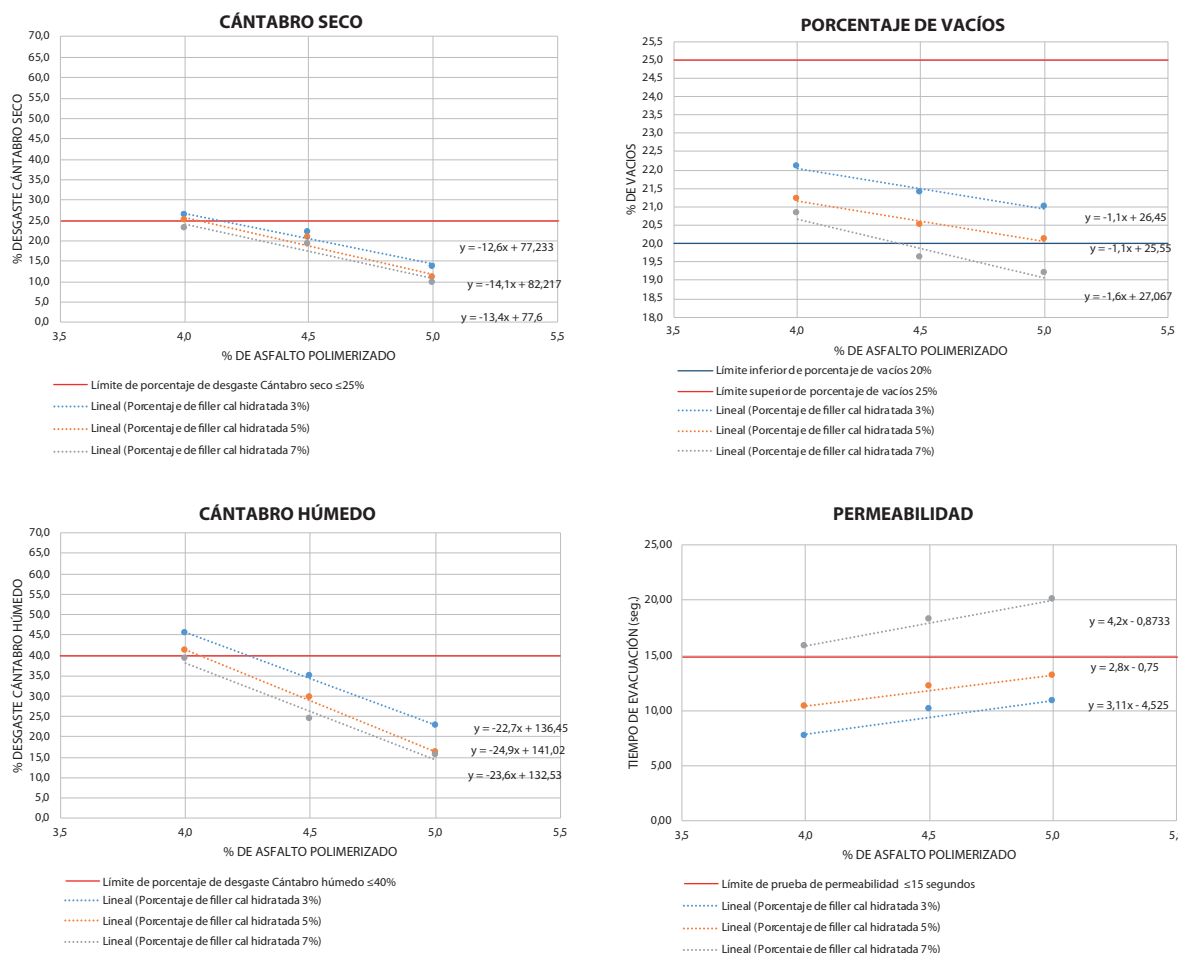
En este caso se utilizó como filler cemento Portland, de acuerdo a los resultados los valores del ensayo Cántabro seco y húmedo son ampliamente favorables en relación a las MAD con filler natural.

La adición de filler cemento Portland en la MAD, reduce el porcentaje de cemento asfáltico polimerizado en comparación a la combinación cemento asfáltico polimerizado y filler natural.

La permeabilidad disminuye a medida que se aumenta el cemento asfáltico polimerizado y el filler de cemento Portland. Solo en caso de 4.5 y 5% de ligante con 7 % de filler los valores de porcentaje de vacíos y permeabilidad no cumple las especificaciones. Como se observa en la figura incrementando el % de ligante y/o el % de filler los valores de permeabilidad y % de vacíos disminuyen desfavorablemente.

4.4 Análisis de resultados con asfalto polimerizado y filler cal hidratada (MADCAP – FCH)

Con los resultados obtenidos, se prepararon las figuras de desgaste en estado húmedo, seco, porcentaje de vacíos y permeabilidad para 4,0%; 4.5% y 5.0% de cemento asfáltico polimerizado y 3%; 5% y 7% filler cal hidratada respecto al contenido de asfalto.



Figuras 13; 14; 15; 16. Resultados (MADCAP – FCH)

Otro filler utilizado en el diseño de MAD es cal hidratada, que al igual que el cemento Portland tiene incidencia favorable en las pruebas de desgaste. Comparando el desgaste con la combinación cemento asfáltico polimerizado y filler cemento Portland, los valores de desgaste son ligeramente mayores.

La permeabilidad, como es lógico, disminuye a medida que se aumenta el cemento asfáltico polimerizado y el filler de cal hidratada.

Las MAD con filler de cemento Portland tiene mejor resistencia al desgaste tanto en estado seco y húmedo en relación a las MAD con cal hidratada. Respecto al porcentaje de vacíos con aire y permeabilidad los valores de ambas combinaciones son similares, presentando ligeras ventajas la MAD con cemento Portland.

Propiedades mecánicas

La resistencia es elemental para que la mezcla pueda soportar los efectos del tráfico y cargas sin degradarse ni deformarse. En ensayo Cántabro es el indicador de resistencia, y sus resultados dependen mayormente del tipo de ligante (viscosidad en servicio), y de la calidad de los agregados (dureza, forma y textura). Estas propiedades son fundamentales, ya que el agregado proporciona la fricción interna mientras que el ligante la cohesión y adherencia necesaria para mantener las partículas unidas, generando la fricción que se traduce en resistencia. En resumen, es una propiedad mecánica.

Propiedades drenantes

La permeabilidad depende del % de vacíos en la mezcla compactada, lo que es función de la gradación del agregado y del contenido de ligante, así cualquier tipo de asfalto y agregados –con la gradación adecuada- puede cumplir con esta propiedad, independientemente de la calidad de los mismos. Es en resumen una propiedad volumétrica.

Propuesta de COA

La determinación del contenido óptimo de asfalto (COA) en las mezclas drenantes (MAD) no está claramente indicado en ninguna de las especificaciones y referencias consultadas, por lo que este relevante aspecto constituye un vacío en la normativa. Las referencias usadas se limitan a determinar los valores máximos o mínimos que debe cumplir la mezcla de acuerdo con los distintos ensayos indicados, pero poco o nada dicen en referencia a la selección de un contenido óptimo de ligante.

5.1 Procedimiento para determinar el COA

El procedimiento sugerido o propuesto para determinar el COA, se apoya en los siguientes conceptos.

- La determinación del contenido óptimo de ligante de toda mezcla asfáltica requiere de buen criterio ingenieril y de sólido conocimiento sobre las propiedades de las mezclas y como éstas son afectadas con las variaciones de los parámetros de diseño.
 - En el caso de MAD se consideran propiedades básicas de la mezcla: la durabilidad o resistencia de la mezcla, caracterizada por la pérdida en el ensayo Cántabro, especialmente en estado húmedo, y la permeabilidad, lo que se relaciona con el contenido de vacíos.
 - Es común que –en una mezcla- se encuentren propiedades en conflicto por lo que normalmente no es factible determinar un % de ligante que logre maximizar las distintas propiedades requeridas.
 - En este caso –como era esperado- al aumentar el % de ligante se mejora la durabilidad, pero se reduce la permeabilidad.
 - Teniendo en cuenta, que el ligante asfáltico es el insumo más costoso de las mezclas, es usual que el COA sea aquel que cumple las propiedades requeridas de la mezcla al menor costo, o sea con el menor contenido de ligante.
 - Con base en estos lineamientos se propone un procedimiento para la determinación del COA en las mezclas drenantes, apoyado en los siguientes pasos:
1. Determinar el % mínimo de ligante que cumpla con todas las propiedades requeridas a la mezcla, según la especificación aplicable. Este valor será –usual-

mente- definido por el desgaste de la mezcla, especialmente el ensayo Cántabro húmedo. Este valor se denominará: MIN1.

2. Determinar el % máximo de ligante que cumple con el requisito de permeabilidad, y además cumple con los demás requisitos. Este valor se denominará: MAX1
3. Con estos dos valores se define un rango (RA1) dentro del cual debe estar el contenido de ligante para que la mezcla cumpla las especificaciones. Este estará limitado por los valores: MIN1 y MAX1.

En forma adicional, de acuerdo con el criterio que las más de las especificaciones, de mezclas asfálticas, indican que la variación permisible en el contenido de ligante de una mezcla –producida en planta- no debe exceder de ± 0.3 % del óptimo seleccionado, se considera este, como un segundo criterio, apropiado para acotar o reducir el rango para la selección del % óptimo de ligante, como se indica a continuación.

4. Con base en este criterio se define un nuevo rango (RA2) en el que el límite inferior MIN2 sería: $MIN2 = MIN1 + 0,3$ y el superior $MAX2 = MAX1 - 0,3$. De esta forma, además que obtener un rango menor para la selección de COA, se asegura, con alto nivel de confiabilidad, que el % de ligante de la mezcla –seleccionado como óptimo- puede variar, dentro del 0,3 % permitido en las especificaciones constructivas, sin comprometer las propiedades de la mezcla producida.
5. Finalmente, el ingeniero seleccionará el COA dentro de este RA2, con base a su criterio y a las propiedades de la mezcla que se sugiera usar de acuerdo con las características de la obra.

Determinación del COA

Para ilustrar el procedimiento propuesto, se utilizará en la determinación del % óptimo de ligante (COA) las cuatro MAD elaboradas con cemento asfáltico convencional, cemento asfáltico polimerizado, filler natural, filler de cemento Portland y Filler de cal hidratada, antes mostradas.

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos en laboratorio de las cuatro mezclas,

determinados mediante las gráficas mostradas, lo que facilita y mejora la precisión en la determinación de cada propiedad en función del contenido de ligante.

Tabla 5. Resumen de resultados de laboratorio (MADCAP – FCP)

% de cemento asfáltico	Ensayos	Cemento Asfáltico Convencional	Cemento Asfáltico Polimerizado	Cemento Asfáltico Polimerizado	Cemento Asfáltico Polimerizado
		5% filler natural	5% filler natural	5% filler cemento Portland	5% filler cal hidratada
4.0	Ensayo Cántabro en estado seco ≤ 25 (%)	40.1 X	25.9 X	24.3	24.9
4.5		28.7 X	21.1	18.9	20.6
5.0		14.5	15.2	10.8	10.8
4.0	Ensayo Cántabro en estado húmedo ≤ 40 (%)	54.4 X	44.1 X	39.8	41.1 X
4.5		49.1 X	30.6	28.2	29.6
5.0		46.0 X	19.3	15.2	16.2
4.0	Porcentaje de vacíos con aire entre 20 y 25 (%)	22.3	21.3	21.7	21.2
4.5		21.5	20.4	20.6	20.5
5.0		20.8	20.2	20.3	20.1
4.0	Permeabilidad ≤ 15 (s.)	8.45	10.27	10.25	10.30
4.5		9.71	12.06	11.55	12.15
5.0		11.19	13.03	12.42	13.10

NOTA. – Los valores con X, no cumplen con la Normativa

6.1 Determinación del porcentaje mínimo de ligante (MIN1)

En el caso de MAD se considera propiedad básica de la mezcla la durabilidad o resistencia, caracterizada por la pérdida en el ensayo Cántabro, especialmente en estado húmedo, por ser la propiedad crítica, por lo cual, se determinará el porcentaje mínimo de ligante en función de este ensayo, verificando que cumpla -además- con todas las propiedades requeridas.

De las ecuaciones mostradas en las figuras 2; 5; 10 y 13, para 5 % de filler, se obtiene el % mínimo de ligante que cumple la propiedad crítica, desgaste Cántabro húmedo 40 %, es para cada mezcla en indicado en la siguiente tabla.

Tabla 6. Determinación del % mínimo de ligante (MIN1)

Tipo de Mezcla Asfáltica Drenante	Ecuaciones desgaste Cántabro húmedo	Para 40% de desgaste Cántabro húmedo	MIN1 (% mínimo de ligante)
MADCAC – FN	$y = -8.4x + 87.633$	40	5.67
MADCAP – FN	$y = -24.8x + 142.93$	40	4.15
MADCAP - FCP	$y = -24.6x + 138.43$	40	4.00
MADCAP - FCH	$y = -24.9x + 141.02$	40	4.06

Los valores de las distintas propiedades de la mezcla para el % mínimo de ligante (MIN1) determinado se muestran en la siguiente Tabla 7. Estos valores se determinaron mediante las ecuaciones de correlación lo que mejora la precisión del análisis.

Tabla 7. Incidencia del % mínimo de ligante (MIN1) en propiedades de MAD

Tipo Mezcla Asfáltica Drenante	MIN1	Desgaste estado seco (%)	Desgaste estado húmedo (%)	Vacíos con aire (%)	Permeabilidad (s.)
MADCAC-FN	5.67	$(y = -25.6x + 142.97)$ 2.2 *	$(y = -8.4x + 87.633)$ 40.0 ✓	$(y = -1.5x + 28.283)$ 19.8 X	$(y = 2.74x - 2.5467)$ 12.99 ✓
MADCAP-FN	4.15	$(y = -10.7x + 68.883)$ 24.5 ✓	$(y = -24.8x + 142.93)$ 40.0 ✓	$(y = -1.1x + 25.583)$ 21.0 ✓	$(y = 2.76x - 0.6333)$ 10.82 ✓
MADCAP-FCP	4.00	$(y = -13.5x + 78.75)$ 24.8 ✓	$(y = -24.6x + 138.43)$ 40.0 ✓	$(y = -1.4x + 27.167)$ 21.6 ✓	$(y = 2.17x + 1.6417)$ 10.3 ✓
MADCAP-FCH	4.06	$(y = -14.1x + 82.217)$ 25.0 ✓	$(y = -24.9x + 141.02)$ 40.0 ✓	$(y = -1.1x + 25.55)$ 21.1 ✓	$(y = 2.8x - 0.75)$ 10.62 ✓

NOTAS. – Los valores con ✓, cumplen con la Normativa; X, no cumplen con la Normativa; * valores no reales obtenidos por extrapolación de las ecuaciones.

Como puede observarse los valores de las MAD con cemento asfáltico polimerizado cumplen con la especificación; sin embargo, el porcentaje de vacíos de la MAD con cemento asfáltico convencional no cumple con la normativa, por lo que se ratifica que los valores de MIN1 como porcentajes mínimos de ligante para las MAD elaboradas con cemento asfáltico polimerizado.

6.2 Determinación del porcentaje máximo de ligante (MAX1)

En el caso de MAD, al aumentar el porcentaje de ligante se mejora la durabilidad, pero se reduce el porcentaje de vacíos y permeabilidad, por lo cual, se determinará el porcentaje máximo de ligante, en función al ensayo de porcentaje de vacíos, verificando que cumpla con todas las propiedades requeridas en la mezcla, según la especificación aplicable.

Seguidamente se determina el porcentaje máximo de ligante (MAX1), de la ecuación correspondiente al valor máximo que cumple los vacíos, obteniéndose los siguientes valores para MAX1.

Tabla 8. Determinación del % máximo de ligante (MAX1)

Tipo de Mezcla Asfáltica Drenante	Ecuaciones de % vacíos	Para 25% de Vacíos	MAX1 (% máximo de ligante)
MADCAC – FN	$y = -1.5x + 28.283$	25	5.52
MADCAP – FN	$y = -1.1x + 25.583$	25	5.07
MADCAP – FCP	$y = -1.4x + 27.167$	25	5.12
MADCAP – FCH	$y = -1.1x + 25.55$	25	5.04

Con el porcentaje máximo de ligante (MAX1), se verifica el cumplimiento de todas las propiedades requeridas de la mezcla, los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Incidencia del % máximo del ligante (MAX1) en propiedades de MAD

Tipo de Mezcla Asfáltica Drenante	MAX1	Desgaste estado seco (%)	Desgaste estado húmedo (%)	Vacíos con aire (%)	Permeabilidad (s.)
MADCAC – FN	5.52	$(y = -25.6x + 142.97)$ 1.7 ✓	$(y = -8.4x + 87.633)$ 41.3 X	$(y = -1.5x + 28.283)$ 20 ✓	$(y = 2.74x - 2.5467)$ 12.58 ✓
MADCAP – FN	5.07	$(y = -10.7x + 68.883)$ 14.6 ✓	$(y = -24.8x + 142.93)$ 17.2 ✓	$(y = -1.1x + 25.583)$ 20.0 ✓	$(y = 2.76x - 0.6333)$ 13.36 ✓
MADCAP – FCP	5.12	$(y = -13.5x + 78.75)$ 9.6 ✓	$(y = -24.6x + 138.43)$ 12.5 ✓	$(y = -1.4x + 27.167)$ 20 ✓	$(y = 2.17x + 1.6417)$ 12.75 ✓
MADCAP – FCH	5.04	$(y = -14.1x + 82.217)$ 11.2 ✓	$(y = -24.9x + 141.02)$ 15.5 ✓	$(y = -1.1x + 25.55)$ 20 ✓	$(y = 2.8x - 0.75)$ 13.36 ✓

NOTA. – Los valores con ✓, cumplen con la Normativa; Los valores con X, no cumplen con la Normativa

Como puede observarse los valores de las MAD elaboradas con cemento asfáltico polimerizado cumplen con la especificación; sin embargo, el desgaste Cántabro en estado húmedo de la MAD elaboradas con cemento asfáltico convencional no cumple el parámetro establecidos en la normativa.

6.3 Determinación de los rangos (RA1) y (RA2)

Con los valores MIN1 y MAX1 antes determinados, se define un rango (RA1) dentro del cual debe estar el contenido de ligante para que la mezcla cumpla las especificaciones.

La Normativas –en general- indican que el porcentaje de ligante podrá variar un máximo de $\pm 0,3$ %, por lo cual, la variación permisible en el contenido de ligante de una mezcla –producida en planta- no debe exceder de $\pm 0,3$ % del óptimo seleccionado. Con base en este criterio se define un nuevo rango (RA2) en el que el límite inferior MIN2 sería: $MIN2 = MIN1 + 0,3$ y el superior $MAX2 = MAX1 - 0,3$, tal como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Determinación de Rango 1 y Rango 2

Tipo de Mezcla Asfáltica Drenante	Rango 1: (RA1) = MIN1 a MAX1	Rango 2: MIN2= MIN1 + 0,3 a MAX2= MAX1 - 0,3.	Valor promedio del Rango 2
MADCAC – FN	5.67 – 5.52*	No aplica	-
MADCAP – FN	4.15 – 5.07	4.45 – 4.77	4.61
MADCAP - FCP	4.00 – 5.12	4.30 – 4.82	4.56
MADCAP - FCH	4.06 – 5.04	4.36 – 4.74	4.55

*Como puede observarse para la mezcla MADCAC-FN, con asfalto convencional y filler natural, ésta no cumple con los requisitos, y los % de ligante entran en conflicto, ya que con ningún % de los usados se cumplen las propiedades requeridas.

Finalmente, se determinará el COA dentro del RA2, con base a las propiedades de la mezcla que se sugiera maximizar de acuerdo con las características de la obra, dentro de las que

puede estar el costo. Así el valor o % en que debe ubicarse el COA está en el Rango 2. Cualquier valor dentro de este rango produce una mezcla que cumple con todas las propiedades requeridas.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se deducen de las MAD ensayadas, por lo que son válidos para los ligantes, agregados, gradación y filler utilizados en este trabajo, que, si bien muestran tendencias acordes para estas MAD, no pueden ser generalizados, ya que cada mezcla tendrá propiedades en función de los componentes usados.

Conclusión

Como se indicó, la normativa consultada y referencial para el presente trabajo, no indica un procedimiento específico para la determinación del contenido óptimo de ligante (COA) de las mezclas drenantes (MAD), lo que en casos es un proceso complejo por cuanto es común que algunas propiedades importantes de la mezcla estén en conflicto. El procedimiento aquí sugerido, o propuesto se considera un aporte –del presente trabajo– para llenar este vacío normativo. No obstante, el mismo debe ser evaluado más en detalle y aplicado con otras mezclas a fin de comprobar su aplicabilidad.

Referencias

- [1] Bardesi, A. (1999). *Fabricación y puesta en obra*. Actas de Congreso Europeo de Mezclas Drenantes. Madrid, España.
- [2] Pérez Jimenez, F.E. (1995). *Mezclas drenantes. Jornadas sobre nuevas especificaciones para productos bituminosos*. Barcelona, España.
- [3] Instituto Nacional de Vías. (2012). *Pavimentos Asfálticos: Capítulo 4*. Segunda Edición. Bogotá D. C. Colombia.
- [4] Administradora Boliviana de Carreteras. (2015). *Manual de ensayos de suelos y materiales. Asfaltos*. Primera Edición. Bolivia.
- [5] Jugo, A. (2017). *Construcción de Pavimentos Asfálticos*. Primera Edición. Venezuela.
- [6] Miró, R. (2006). *Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (ruido) y la seguridad*. Primera Edición. España.
- [7] Rondón, A. et al. (2007). "Estado del conocimiento del estudio sobre mezclas asfálticas modificadas en Colombia" Revista, *Infraestructura Vial*, Bogotá, Colombia.
- [8] Muñoz-Rojas, G. y Ruiz-Rodrigo, C. (1999) "Metodología de diseño y colocación de Mezclas drenantes" Memorias del 10° Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto CILA. España 1999.