



DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS RECICLADAS EN CALIENTE UTILIZANDO LA HERRAMIENTA DEL POLÍGONO DE VACÍOS

Orlando Fabrizio Ramos Villanueva
Universidad Autónoma de Querétaro
ramos.orlando.ic@gmail.com

Pedro Limón Covarrubias
Universidad de Guadalajara
Ingenieria_limon@hotmail.com

Resumen.

La importancia de la herramienta conocida como “polígono de vacíos”, radica en la reducción de especímenes y ensayos necesarios para establecer el contenido óptimo de asfalto, con el cual se satisfagan las propiedades volumétricas que le confieren durabilidad y buen comportamiento a las mezclas asfálticas. Esta herramienta fue concebida inicialmente solo para el diseño de mezclas asfálticas vírgenes. En este trabajo se diseñaron mezclas asfálticas con 0% (metodología tradicional), 15%, 30% y 45% de RAP (polígono de vacíos), mediante el Protocolo AMAAC PA-MA 01/2013. Los asfaltos de aporte para las mezclas asfálticas con RAP fueron el producto de la combinación del asfalto base (PG76-16) con un aditivo rejuvenecedor. Los resultados revelan que es factible integrar al “polígono de vacíos” en la metodología de Protocolo AMAAC para el diseño de mezclas asfálticas recicladas, ya que permitió reducir la cantidad de especímenes desde dieciséis mediante la metodología tradicional, hasta un mínimo de seis por medio del polígono de vacíos, siendo esta herramienta un apoyo sustancial para optimizar la cantidad de ensayos requeridos y el tiempo necesario para su ejecución.

Palabras clave: Mezcla Asfáltica, RAP, Protocolo AMAAC, Aditivo Rejuvenecedor.

Introducción.

Las mezclas asfálticas en caliente son materiales utilizados en la construcción de caminos y carreteras, las cuales consisten de la combinación de cemento asfáltico, agregados gruesos, agregados finos y polvo rellenedor en varias proporciones, con la finalidad de producir una mezcla de graduación densa, semi-abierta o abierta, por mencionar algunas. Las características de cada uno de los materiales y la forma en que interactúen, este determinará la durabilidad y desempeño que pueda lograr la mezcla asfáltica a través del tiempo. Eso hace imperante la necesidad de buscar



materiales adecuados que aseguren un correcto rendimiento del pavimento asfáltico (Garnica, Flores, Gómez, & Delgado, 2005; Valdés-Vidal, Calabi-Floody, Miró-Recasens, & Norambuena-Contreras, 2015). Además de lo anterior, el diseño volumétrico juega un papel importante en el comportamiento de las mezclas asfálticas al investigar las proporciones más adecuadas de sus dos principales componentes (cemento asfáltico y agregados). La principal finalidad del diseño volumétrico de mezclas asfálticas es la de seleccionar un contenido de aglutinante asfáltico, en el cual, las propiedades volumétricas que tienen mayor impacto en el comportamiento de la mezcla asfáltica sean equilibradas: vacíos de aire (V_a), vacíos en el agregado mineral (VAM) y vacíos llenos de asfalto (VFA). La Tabla 1 enlista el nombre análogo de estas propiedades y su importancia en el comportamiento de la mezcla asfáltica (Marín & Thenoux, 2014).

Tabla 1. Principales propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica y su importancia (Garnica, Delgado, Gómez, Alonso, & Alarcón, 2004; Marín & Thenoux, 2014).

Propiedad volumétrica	Nombre análogo a geomateriales	Importancia
Vacíos de aire (V_a)	Vacíos totales	Una baja proporción de vacíos de aire conduce a fallas por deformación permanente. Una alta proporción de vacíos de aire conduce a fallas frágiles, sobrevejecimiento, permeabilidad alta y daños debido a la humedad.
Vacíos en el agregado mineral (VAM)	Porosidad	Asegura una adecuada película de espesor suficiente sobre las partículas de agregado para que la mezcla sea durable.
Vacíos llenos de asfalto (VFA)	Grado de saturación	Delimita el porcentaje máximo de VAM, así como de contenido de asfalto. Bajo condiciones de tráfico pesado, ayuda a mitigar mezclas susceptibles a la formación de roderas.

Con la correcta selección de este contenido “óptimo” de asfalto, el ingeniero diseñador busca que la mezcla asfáltica diseñada garantice un adecuado comportamiento ante los principales deterioros a los que se enfrentará una vez puesta en servicio como parte de un pavimento asfáltico: la deformación permanente, la fisuración por fatiga y la fisuración por baja temperatura (Marín & Thenoux, 2014; McGennis, Anderson, Kennedy, & Solaimanian, 1994).

En las metodologías tradicionales de diseño de mezclas asfálticas (Marshall, Superpave, Protocolo AMAAC), la determinación del contenido “óptimo de asfalto”, requiere de la fabricación de un conjunto de especímenes con distintos contenidos de asfalto y por ende distintas propiedades volumétricas, entre los cuales se encuentra ese “óptimo”. La importancia de la herramienta conocida como “polígono de vacíos”, radica en la reducción de especímenes y ensayos necesarios para establecer el contenido óptimo de asfalto, con el cual se satisfagan todas las propiedades volumétricas.



En esta investigación se diseñó una mezcla con 0% de RAP mediante el procedimiento tradicional, y tres mezclas con 15%, 30% y 45% de RAP mediante el polígono de vacíos. Se analizó las características físicas y reológicas de los agregados y aglutinantes provenientes del RAP, con la finalidad de determinar las características del asfalto de aporte por utilizar (uso de cartas de mezclado). Un aditivo rejuvenecedor fue empleado para mitigar los efectos negativos del asfalto envejecido del RAP.

El principal objetivo de este documento es demostrar que el “polígono de vacíos” es una herramienta eficiente que puede ser integrada como parte de la metodología propuesta por Protocolo AMAAC, para el diseño de mezclas asfálticas de alto desempeño de granulometría densa y haciendo uso de recuperado de pavimento asfáltico (RAP).

Antecedentes.

3.1 Uso del RAP en las mezclas asfálticas recicladas.

Los primeros esfuerzos de la recuperación y reutilización de materiales de pavimento asfáltico de los que se tiene conocimiento fueron desarrollados durante 1974 en Nevada y Texas, como el resultado del alza de los precios en los hidrocarburos que originó el Embargo Petrolero Árabe a principios de los años 1970's (Copeland, 2011; Hajj, Sebaaly, & Kandiah, 2009; Newcomb, Brown, & Epps, 2007; West, 2015).

En años recientes, se han desarrollado investigaciones con respecto al tema de las mezclas asfálticas recicladas, donde el RAP es un subproducto muy comúnmente utilizado, ya sea en su totalidad (mezclas con 100% de RAP), o parcialmente (mezclas con materiales vírgenes y recuperados). Para conocer adecuadamente la interacción entre los aglutinantes asfálticos vírgenes y los envejecidos provenientes del RAP, es fundamental caracterizar a estos mediante la determinación de sus módulos de corte dinámico (G^*), ángulos de fase (δ) y viscosidades. Además de lo anterior, es de suma importancia tener en cuenta el Grado de Desempeño PG de ambos aglutinantes, tanto para alta temperatura, como para baja temperatura. En el diseño de las mezclas asfálticas recicladas se debe determinar que características debe tener el cemento asfáltico virgen para poder incorporarse a una dosificación de RAP determinada o, establecer la proporción de RAP que puede incorporarse a una mezcla asfáltica a fin de lograr unas ciertas características en la combinación de aglutinantes asfálticos. El enfoque propuesto por AASHTO M323 se resumen en la Tabla 2 (Al-Qadi, Elseifi, & Carpenter, 2007; Copeland, 2011).



Tabla 2. Especificación para la selección del aglutinante de aporte para mezclas con RAP.

Porcentaje de RAP	Importancia
< 15	Sin cambio en la selección del grado PG del asfalto de aporte.
16 al 25	Reducir un grado PG al asfalto de aporte
> 25	Utilizar una carta de mezclado para definir el PG del asfalto de aporte

La Figura 1, muestra un claro ejemplo de cartas de mezclado en las cuales se determina la cantidad máxima de RAP por incorporar una vez que se ha fijado el PG de alta temperatura (mediante el Reómetro de corte dinámico, DSR), y el PG de baja temperatura (mediante el Réometro de viga a flexión, BBR).

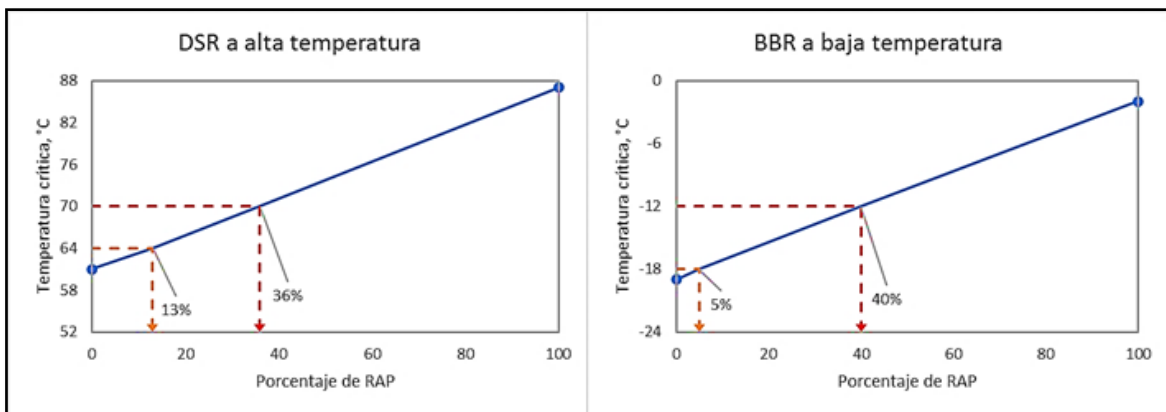


Figura 1. Ejemplo de cartas de mezclado para determinar el porcentaje de RAP cuando los grados PG del aglutinante asfáltico de diseño han sido establecidos.

Por otro lado, el uso de agentes rejuvenecedores ha demostrado que proporciona las siguientes ventajas (Yu, Zaumanis, dos Santos, & Poulidakos, 2014; Zaumanis, Mallick, & Frank, 2015): Amplían el rango de uso de RAP, es decir, favorecen el uso de 100% de RAP; el almacenamiento del aditivo es económico, ya que por lo general no requieren calentamiento; son de fácil adición en la mezcla mediante bombas o sistemas de dosificación en líquido; proporcionan una alta probabilidad de dosificarlos adecuadamente en base a las propiedades del asfalto de RAP; y, por lo general, reducen los costos en la fabricación de mezclas asfálticas recicladas. Las mezclas asfálticas recicladas que han hecho uso de aditivos rejuvenecedores han visto mejoradas algunas de sus propiedades, las cuales no son posibles de conseguir con la mezcla de asfaltos de aporte (más suaves o blandos) con los asfaltos envejecidos del RAP. Se ha visto que la mezclas con aditivo rejuvenecedor tienen mejor comportamiento ante la fatiga, ante la deformación permanente y ante la susceptibilidad a la humedad en comparación con mezclas elaboradas con materiales 100% vírgenes (Shen, Amirkhanian, & Aune Miller, 2007; Silva, Oliveira, & Jesus, 2012; Zaumanis, Mallick, & Frank, 2014).

3.2 Definición del polígono de vacíos.

El polígono de vacíos es una herramienta analítica que forma parte de la metodología RAMCODES, en la cual se reduce la cantidad de ensayos necesarios para estimar de manera adecuada el contenido de asfalto para el cual se cumplen las propiedades volumétricas más importantes vistas en la Tabla 1. La construcción de este elemento se hace en base a la Gravedad Bruta Compacta (G_{mb}) que la mezcla debe tener para que se cumplan las propiedades vistas en la Tabla 1; las ecuaciones 1 a la 3, muestran las expresiones que se utilizan en la construcción del polígono de vacíos y la Tabla 3 muestra el significado de cada variable (Marín & Thenoux, 2014; Sánchez-Leal, Anguas, Larreal, & López Valdés, 2011):

$$V_a \rightarrow G_{mb} = \frac{(1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{(1 - P_b)}{G_{se}}} \quad (1)$$

$$VAM \rightarrow G_{mb} = \frac{(1 - VAM)}{(1 - P_b)} G_{sb} \quad (2)$$

$$VFA \rightarrow G_{mb} = \frac{VFA}{\frac{VFA(1 - P_b)}{100G_{sb}} - \frac{(1 - P_b)}{G_{sb}} + \frac{100}{G_{mm}}} \quad (3)$$

Tabla 3. Significado de los términos de las ecuaciones 1 a 3.

Variable	Significado
G_{mb}	Gravedad bruta compacta de una mezcla asfáltica.
V_a	Vacíos de aire presente en esa mezcla compacta.
P_b	Contenido de asfalto presente en la mezcla, expresado como porcentaje del total de la mezcla.
G_b	Gravedad específica del aglutinante asfáltico.
G_{se}	Gravedad específica efectiva de los agregados.
G_{sb}	Gravedad específica bruta de la combinación de agregados.
VAM	Vacíos en el agregado mineral presentes en la mezcla.
VFA	Vacíos llenos de asfalto dentro de la mezcla.
G_{mm}	Gravedad teórica máxima de la mezcla, obtenida en estado suelto.

Todo polígono de vacíos se representa en un plano “ P_b vs G_{mb} ”, donde en el eje de las abscisas se establecen los contenidos de asfalto a utilizar, y en las ordenadas, se grafica el correspondiente valor de gravedad bruta compacta de la mezcla. Sánchez- Leal (2011), recomendó utilizar las siguientes especificaciones:

- Porcentaje de vacíos: mínimo igual a 3%, y el máximo igual a 5%.



- Porcentaje de vacíos en el agregado mineral: mínimo el que se especifique según el tamaño nominal del agregado, y máximo 2% superior al mínimo.
- Porcentaje de vacíos llenos de asfalto: por lo general el mínimo sería 65%, y el máximo igual a 75%.

Como producto de la intersección de las líneas que se trazan al variar el contenido de asfalto para las condiciones anteriormente expuestas, formarán una figura geométrica donde cualquier punto dentro de esta, cumplirá todas las especificaciones para las propiedades volumétricas. Sin embargo, el centroide de esa figura, es la que define la fórmula de trabajo o, mejor dicho, el contenido óptimo de asfalto.

Metodología y materiales.

La metodología llevada a cabo en el presente trabajo se muestra de manera resumida en la Figura 2.

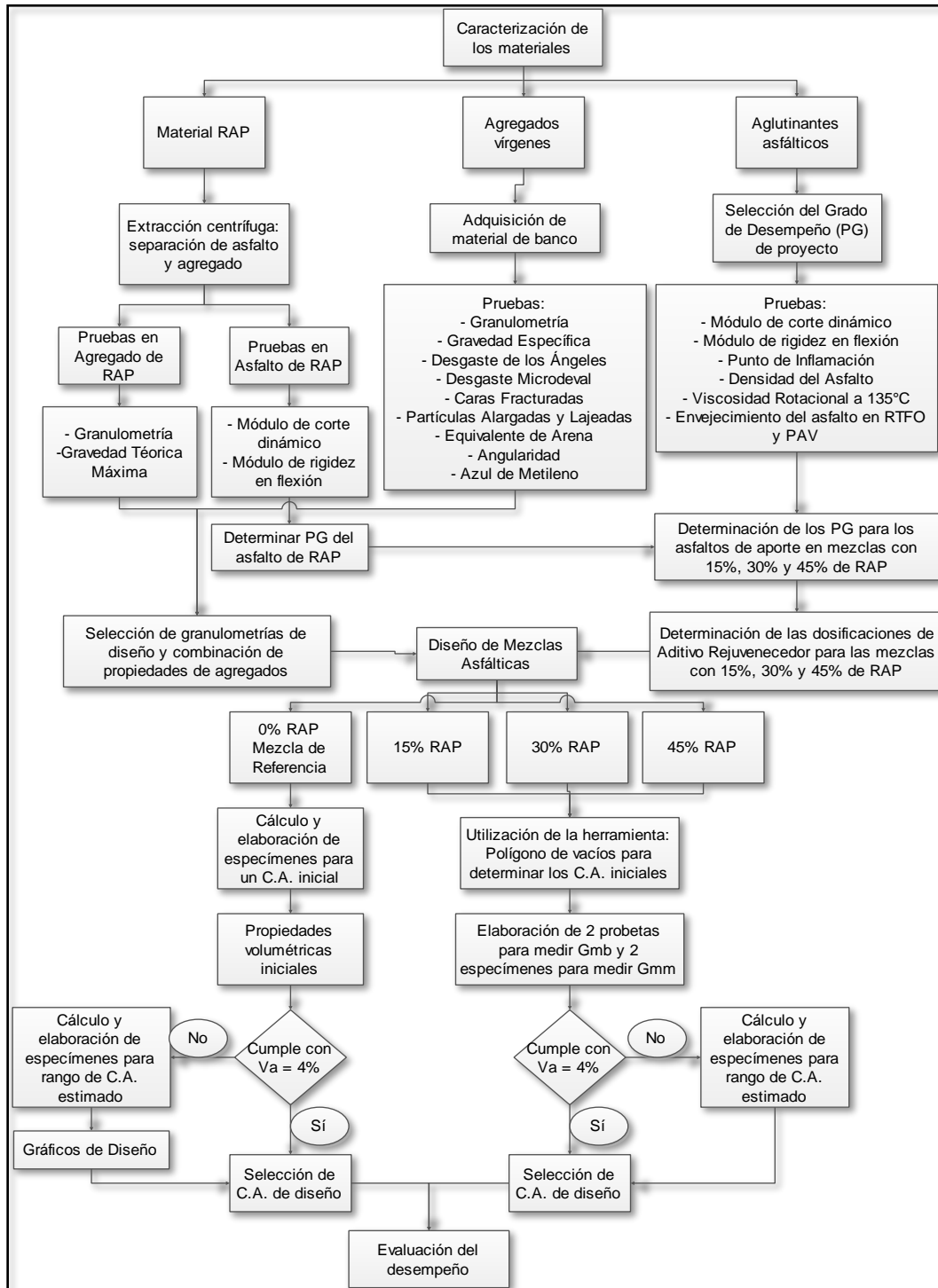


Figura 2. Diagrama de flujo que representa la metodología de la presente investigación.

El RAP fue obtenido mediante equipo de fresado de la capa asfáltica proveniente de la autopista Guadalajara a Zapotlanejo Km 17 +000. Los agregados vírgenes



fueron proporcionados por la empresa Asfaltos de Guadalajara S.A., planta Tonalá, los cuales consistieron de agregado grueso de 12.5 mm de tamaño nominal y arena No.4. El aglutinante asfáltico base para el diseño de las mezclas asfálticas fue formulado a partir de un asfalto virgen EKBÉ 542, modificado con 1% de Terpolímero RET, y 0.1% de Ácido Polifosfórico. El PG final de este asfalto base fue PG 76-16. Para las mezclas recicladas se empleó un aditivo rejuvenecedor conocido como Surfax RF1.

Resultados.

4.1 Características de los materiales.

En la Tabla 4 se muestran las características del RAP, el cual fue separado en fracción gruesa (retenido en malla No.4) y fracción fina (pasa la malla No.4), con la finalidad de facilitar su manipulación. En la Tabla 5 se muestran las características de los agregados vírgenes utilizados en la investigación. En la Tabla 6 se exhiben las características del aglutinante asfáltico base utilizado en la mezcla con 0% de RAP, mismo que, junto con el aditivo rejuvenecedor, sirvió para formular los asfaltos de aporte en las mezclas recicladas.

Tabla 4. Características físicas y reológicas de los agregados y aglutinantes provenientes del RAP.

Abertura (pulg.)	Abertura (mm)	RAP fino % Pasa	RAP grueso % Pasa	Característica	Resultado
1 "	25	100	100	Contenido de asfalto en RAP grueso	3.4 %
3/4 "	19	100	100	Contenido de asfalto en RAP fino	6.8 %
1/2 "	12.5	100	99.3	Alta temperatura de falla medido en DSR	107.5 °C
3/8 "	9.5	100	77.4	Baja temperatura de falla medido en BBR	0 °C
No. 4	4.75	100	31.3	Clasificación PG correspondiente	PG106-10
No. 8	2.36	82.0	23.3		
No. 16	1.18	50.2	15.5		
No. 30	0.6	33.6	9.1		
No. 50	0.3	26.2	6.7		
No. 100	0.15	17.6	3.9		
No. 200	0.075	8.2	2.2		



Tabla 5. Características de los agregados vírgenes utilizados.

Abertura (pulg.)	(mm)	Arena	Grava	Característica	Resultado	Especif
		% Pasa	% Pasa			
1 "	25	100	100	Desgaste "Los Ángeles"	14 %	30 máx.
3/4"	19	100	100	Desgaste Micro-Deval	9 %	18 máx.
1/2 "	12.5	100	96	Part. planas/alargadas	1.3 %	10 máx.
3/8 "	9.5	100	57	Caras fracturadas (2 mín)	95 %	90 mín.
No. 4	4.75	100	14	Densidad bruta grava	2.745	---
No. 8	2.36	85	1	Absorción grava	0.9	---
No. 16	1.18	42	0	Equivalente de Arena	64 %	50 mín.
No. 30	0.6	30	0	Angularidad	39 %	40 mín.
No. 50	0.3	23	0	Azul de metileno	13 ml/g	15 máx.
No. 100	0.15	17	0	Densidad bruta arena	2.651	---
No. 200	0.075	13	0	Absorción arena	2.0	---

Tabla 6. Características físicas y reológicas del aglutinante asfáltico utilizado.

Parámetro o Prueba	Resultado	Especificación ¹
Asfalto Modificado, condición original		
Punto de inflamación Cleveland, °C	< 300	230 mín.
Densidad del asfalto	1.029	No aplica
Viscosidad rotacional a 135°C, Pa-s	2	3
Módulo de corte dinámico a 76°C ($ G^* /\text{sen } \delta$), KPa	1.275	1.00 mín.
Después de RTFO		
Pérdida en masa por calentamiento, %	0.35	1.00 máx.
Módulo de corte dinámico a 76°C ($ G^* /\text{sen } \delta$), KPa	3.198	2.20 mín.
Después de PAV		
Rigidez del asfalto ($G^* \text{ sen } \delta$) a 34°C, KPa	1127	5000 máx.
Módulo de rigidez a flexión (S) a -6 °C, MPa	75.27	300 máx.
Valor "m" a -6 °C,	0.3124	0.3 mín.

El cemento asfáltico base fue establecido como PG 76-16, lo anterior debido a que se tomó como caso de estudio la autopista Guadalajara – Zapotlanejo, la cual, es la misma de la procedencia del RAP. El grado de desempeño mínimo que se requirió fue PG 76-10, luego de ser ajustado por efectos de temperatura y tránsito esperado. Una vez que se tuvo listo el asfalto base, se procedió a estimar el “grado de desempeño” que debe tener el asfalto de aporte en las mezclas asfálticas con RAP, lo anterior mediante “cartas de mezclado”. La Figura 3 muestra las cartas de mezclado para determinar la alta temperatura y baja temperatura de los grados de desempeño necesarios en los asfaltos de aporte para las mezclas con 15% 30% y 45% de RAP, respectivamente. A partir de dicha figura se establecieron como asfaltos de aporte los siguientes: un asfalto PG 70-22 para utilizarse en la mezcla con 15% de RAP, un asfalto PG 58-22 para su uso en la mezcla con 30% de RAP, y un asfalto PG 46-22 para ser utilizado en la mezcla con 45% de RAP. Con base en la Figura 4 se determinaron los porcentajes de aditivo rejuvenecedor a mezclar con el asfalto base para producir los asfaltos de aporte cuyos grados de desempeño sean los anteriormente mencionados.

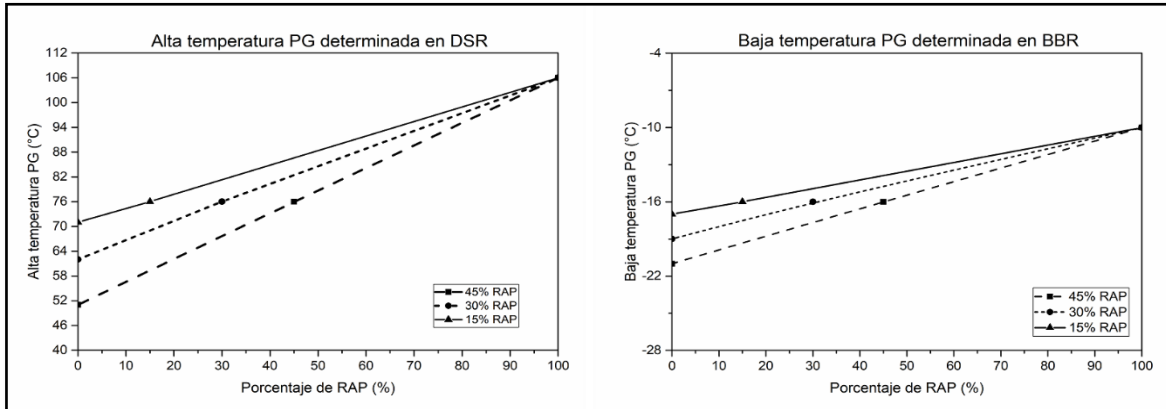


Figura 3. Cartas de Mezclado para determinar la alta y baja temperatura PG de los asfaltos de aporte para las tres mezclas con RAP.

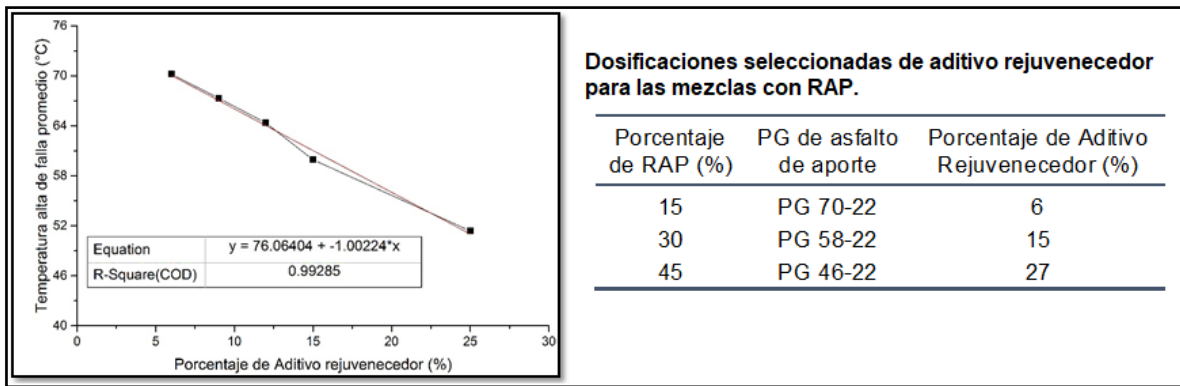


Figura 4. Selección de las dosificaciones de aditivo rejuvenecedor para producir los asfaltos de aporte para las mezclas asfálticas recicladas.

4.2 Granulometrías de diseño y combinación de propiedades de agregados.

Las granulometrías diseñadas cumplen los requisitos especificados para las mezclas de 12,5 mm de tamaño nominal, y se componen de cuatro materiales: agregado grueso virgen, agregado fino virgen, RAP grueso y RAP fino. Estas granulometrías fueron diseñadas de modo que sean muy similares entre sí, esto con la finalidad de reducir la influencia de la granulometría en la determinación del contenido óptimo de asfalto. La distribución granulométrica de cada mezcla se muestra en la Tabla 7 y en la Figura 5. La Tabla 8 muestra un resumen de las propiedades combinadas de los agregados vírgenes y de RAP.



Tabla 7. Distribución granulométrica de las mezclas diseñadas.

Abertura de mallas (pulgadas)	Mezcla Referencia (mm)	Mezcla 15% RAP % Pasa	Mezcla 30% RAP % Pasa	Mezcla 45% RAP % Pasa
3/4"	19	100	100	100
1/2 "	12.5	97.7	98.0	98.3
3/8 "	9.5	74.4	76.4	78.0
No. 4	4.75	48.1	49.9	50.3
No. 8	2.36	34.3	36.4	37.3
No. 16	1.18	17.2	19.1	20.3
No. 30	0.6	12.1	13.2	13.8
No. 50	0.3	9.3	10.1	10.5
No. 100	0.15	7.1	7.5	7.6
No. 200	0.075	5.3	5.3	5.1

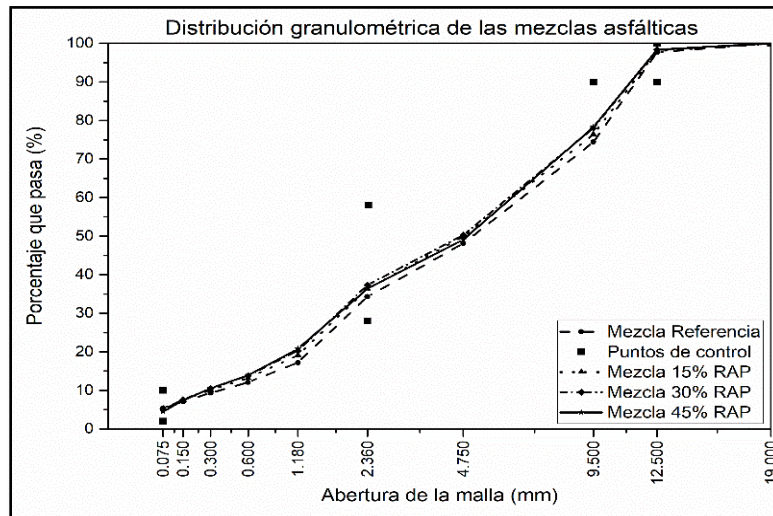


Figura 5. Gráficas de las distribuciones granulométricas de las mezclas diseñadas.

Tabla 8. Resumen de propiedades combinadas de los agregados en las mezclas diseñadas.

%RAP en mezcla	0	15	30	45
%RAP Fino	0	5	8	15
%RAP Grueso	0	10	22	30
% Agregado Grueso	60	50	40	35
% Agregado Fino	40	35	30	20
Gmm RAP combinado	---	2.451	2.500	2.451
Contenido de Asfalto en RAP fino	---	6.8	6.8	6.8
Contenido de Asfalto en RAP grueso	---	3.4	3.4	3.4
Gse/Gsb agregados de RAP	---	2.623	2.672	2.623
Gsb combinado	2.707	2.693	2.694	2.670
Contenido de Asfalto combinado	0.0	0.7	1.3	2.0



4.3 Diseño volumétrico de las mezclas.

Como se señaló al final del Capítulo 1, la mezcla con 0% de RAP se diseñó mediante el método tradicional de Superpave o Protocolo AMAAC. El contenido de asfalto inicial o de prueba se definió conforme a AASHTO R35, para lo cual se fabricaron 2 especímenes compactos y 2 para determinar su densidad para ese contenido de asfalto. En la etapa de diseño, cinco contenidos de asfalto fueron propuestos, para lo cual, se fabricaron 10 probetas compactas, y 2 muestras para medir la Gravedad teórica máxima (G_{mm}) para un contenido de asfalto intermedio. Los resultados de este estudio están resumidos en la Tabla 9, en la cual se muestran las propiedades volumétricas obtenidas. En la Figura 6, se muestran los gráficos de diseño los cuales sirven para definir el contenido óptimo de asfalto, el cual fue fijado en 6.7% para esta primera mezcla (0% de RAP).

Tabla 9. Resumen de propiedades volumétricas para distintos contenidos de asfalto.

Contenido de asfalto probado, %	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4	Especificación
Gravedad teórica Máxima (G _{mm})	2.541	2.521	2.502	2.481	2.464	N.A.
Gravedad bruta compacta (G _{mb})	2.333	2.329	2.351	2.399	2.403	N.A.
%G _{mm} @N _{dis} , %	91.8	92.4	94.0	96.7	97.5	96
Vacíos de aire (Va), %	8.2	7.6	6.0	3.3	2.5	4
VAM, %	18.5	19.0	18.7	17.5	17.8	14 mín.
VFA, %	55.7	59.9	67.7	81.0	86.0	65 – 75
Proporción de polvo	1.17	1.05	0.96	0.88	0.81	0.6 – 1.2
%G _{mm} @N _{ini} , %	83.9	83.4	86.5	88.4	89.1	≤ 89

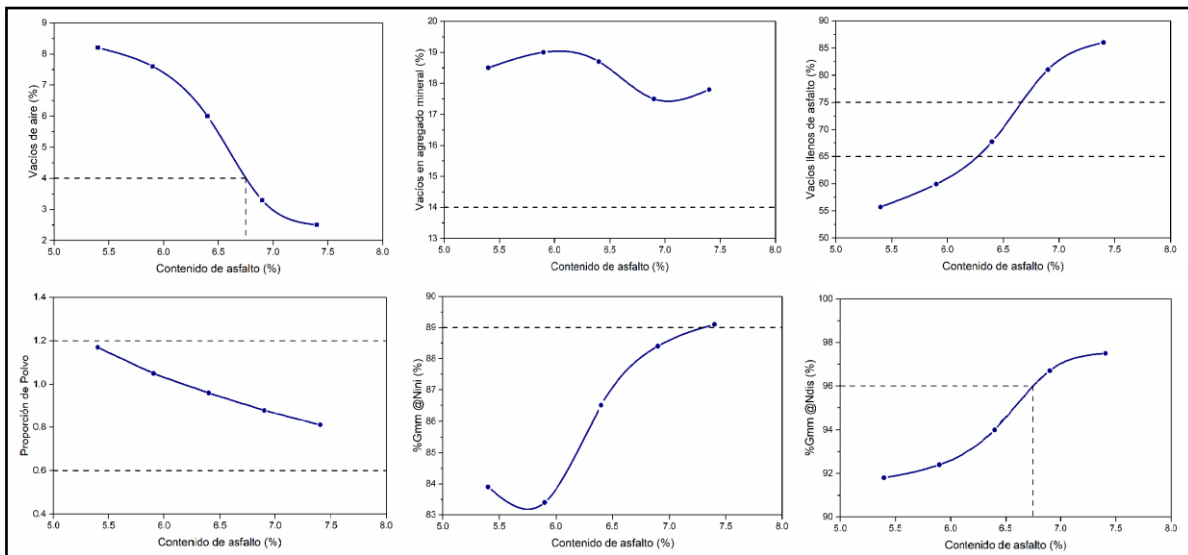


Figura 6. Gráficos de diseño para determinar el contenido óptimo de asfalto en la mezcla con 0% de RAP.



El diseño volumétrico mediante el Polígono de Vacíos, por otra parte, requirió inicialmente la elaboración de 2 muestras con un contenido de asfalto de prueba, el cual se utilizó para determinar la Gravedad Teórica Máxima (Gmm). Con esta información y su manipulación en una hoja de cálculo, se determinaron los polígonos de vacíos para cada una de las mezclas asfálticas con RAP. En la Figura 7, se muestran dichos gráficos. El siguiente paso consistió en fabricar 2 especímenes compactos y 2 especímenes para medir la Gravedad Teórica Máxima (Gmm), para el contenido de asfalto que indicó el polígono de vacíos. La Tabla 10, muestra un resumen de las propiedades volumétricas encontradas para las mezclas recicladas recién diseñadas.

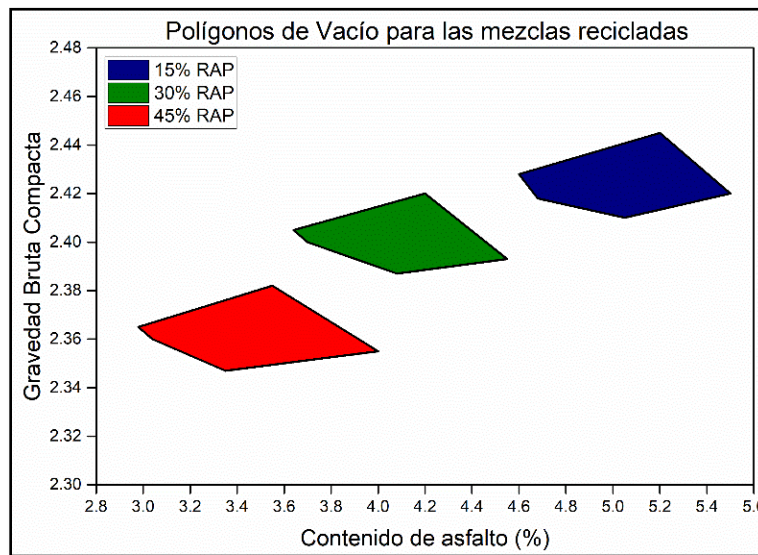


Figura 7. Polígonos de vacíos para las mezclas asfálticas recicladas.

Tabla 10. Resumen de propiedades volumétricas para las mezclas asfálticas recicladas.

Mezcla ensayada	15% RAP	30% RAP	45% RAP	Especificación
Contenido de asfalto de aporte, %	5.1	4.0	3.1	
Contenido de asfalto total, %	5.8	5.3	5.1	
Gravedad Teórica Máxima, G_{mm}	2.509	2.522	2.527	N.A.
Gravedad Bruta Compacta, G_{mb}	2.406	2.424	2.425	N.A.
% G_{mm} @ N_{dis}	95.9%	96.1%	96.0%	96 %
Vacios de aire, V_a	4.1%	3.9 %	4.0 %	4.0 %
Vacios en el agregado mineral, VMA	15.9 %	14.8 %	13.8 %	14 % mín.
Vacios llenos de asfalto, VFA	73.9 %	73.8 %	70.8 %	65 – 75 %
Proporción de polvo, DP	0.91	0.96	0.88	0.6 – 1.2
% G_{mm} @ N_{ini}	86.4 %	86.8 %	86.7 %	≤ 89 %
% G_{mm} @ N_{max}	96.7 %	96.3 %	96.8 %	≤ 98 %

Para todas las mezclas recicladas se cumplieron todas las propiedades volumétricas; para la mezcla con 45% de RAP se presenta un VAM ligeramente

menor al especificado, sin embargo, éste se considera aceptable. Los contenidos óptimos de asfalto de aporte y total son los siguientes:

- 5.1% de asfalto de aporte (5.8% total), para la mezcla con 15 % de RAP.
- 4.0% de asfalto de aporte (5.3% total), para la mezcla con 30 % de RAP.
- 3.1% de asfalto de aporte (5.1% total), para la mezcla con 45 % de RAP.

En la Tabla 11, se muestra una relación de la cantidad de especímenes fabricados con la finalidad de definir el contenido óptimo de asfalto para cada mezcla diseñada.

Tabla 11. Relación de especímenes necesarios para determinar el contenido óptimo de asfalto para cada metodología.

Metodología	Convencional/Tradicional			Polígono de vacíos		
	Gmb	Gmm	Sub-total	Gmb	Gmm	Sub-total
Especímenes para:						
Contenido de asfalto inicial	2	2	4	0	2	2
Determinar contenido óptimo de asfalto	10	2	12	2	2	4
Total	12	4	16	2	4	6

Con los resultados expuestos en la Tabla 11 se puede apreciar la evidente reducción de especímenes y ensayos que ofrece la metodología del Polígono de vacíos.

Conclusiones.

El Polígono de vacíos demostró ser una herramienta eficiente, ya que redujo la cantidad de especímenes necesarios para establecer la fórmula de trabajo (contenido óptimo de asfalto), así como el tiempo necesario para la ejecución de los ensayos y del diseño en general. En el diseño “tradicional” se requirió de dieciséis especímenes para lograr el objetivo principal, mientras que para cada mezcla asfáltica con RAP solo se necesitaron seis especímenes, esto nos supone una reducción de más del 60% del trabajo necesario para definir el contenido óptimo de asfalto. Un aspecto importante por resaltar aplicable solo a esta investigación, es el hecho de que la abscisa del centroide del polígono de vacíos no siempre indicó el contenido óptimo de asfalto, lo cual se puede ver en el diseño de la mezcla con 45% de RAP, pues el centroide de su correspondiente polígono indica que 3.5% de asfalto sería el óptimo, sin embargo, se puede apreciar que el contenido de asfalto óptimo se encontró en 3.1%. Esta variación puede ser debido a la alta variabilidad del RAP y al alto contenido de este producto en la mezcla reciclada. No obstante, el Polígono de vacíos sigue manifestándose como una herramienta que puede incorporarse al diseño de mezclas asfálticas recicladas de alto desempeño, ya que



nos permite delimitar con mucha certeza, el rango de contenidos de asfalto con los que podemos cumplir las propiedades volumétricas de una mezcla asfáltica.

Agradecimientos.

Especiales agradecimientos al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ) y al Gobierno del Estado de Querétaro, por el apoyo económico otorgado para llevar a cabo la redacción de este documento y su presentación formal en el Décimo Congreso Mexicano del Asfalto. De igual manera se le agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado, el cual colaboró sin duda alguna en la culminación de esta investigación. De igual manera se le agradece en demasía todo el apoyo brindado por equipo de trabajo del Laboratorio Lasfalto S.A., pues sin su ayuda esta investigación no se habría podido llevar a cabo.

Referencias.

- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). Reclaimed asphalt pavement—a literature review. *FHWA-ICT-07-001*. Recuperado a partir de <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/46007>
- Copeland, A. (2011). *Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice* (No. FHWA-HRT-11-021) (p. 55). McLean Virginia: Federal Highway Administration. Recuperado a partir de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1104401>
- Garnica, P., Delgado, H., Gómez, J. A., Alonso, S., & Alarcón, H. A. (2004). *Aspectos del diseño volumétrico de mezclas asfálticas* (Publicación Técnica No. 246). Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Garnica, P., Flores, M., Gómez, J. A., & Delgado, H. (2005). *Caracterización Geomecánica de Mezclas Asfálticas* (Publicación Técnica No. 267). Sanfandila, Querétaro: Instituto Mexicano del Transporte.
- Hajj, E. Y., Sebaaly, P. E., & Kandiah, P. (2009). Evaluation of the use of reclaimed asphalt pavement in airfield HMA pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 136(3), 181–189.
- Marín, C. R., & Thenoux, G. A. (2014, abril). Validation of the Polygon-Of-Voids Tool for Asphalt Mixtures with RAP. *Revista de la Construcción - Pontificia Universidad Católica de Chile*, 13, 56-63.
- McGennis, R. B., Anderson, R. M., Kennedy, T. W., & Solaimanian, M. (1994). *Background of SUPERPAVE Asphalt Mixture Design and Analysis* (Final Report No. FHWA-SA-95-003). Lexington, Ky: Asphalt Institute.
- Newcomb, D. E., Brown, E. R., & Epps, J. A. (2007). *Designing HMA Mixtures with High RAP Content* (Final Report No. QIP 124) (p. 36). Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.
- Sánchez-Leal, F. J., Anguas, P. G., Larreal, M., & López Valdés, D. B. (2011). Polyvoids: Analytical Tool for Superpave HMA Design. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(8), 1129-1137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000275](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000275)
- Shen, J., Amirkhani, S., & Aune Miller, J. (2007). Effects of rejuvenating agents on superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(5), 376–384.
- Silva, H. M. R. D., Oliveira, J. R. M., & Jesus, C. M. G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>



Valdés-Vidal, G., Calabi-Floody, A., Miró-Recasens, R., & Norambuena-Contreras, J. (2015). Mechanical behavior of asphalt mixtures with different aggregate type. *Construction and Building Materials*, 101, 474-481. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.050>

West, R. C. (2015). *Best Practices for RAP and RAS Management* (Final Report No. QIP 129) (p. 44). Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association.

Yu, X., Zaumanis, M., dos Santos, S., & Poulidakos, L. D. (2014). Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162-171. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230-245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>

Zaumanis, M., Mallick, R. B., & Frank, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt. *Materials and Structures*, 48(8), 2475-2488. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5>