

Validation of the polyvoids in the design of bituminous mixtures with coal tar as a binder

Validación del polígono de vacíos en el diseño de mezclas bituminosas con alquitrán de hulla como ligante

R. Ochoa ^{1*}, G. Grimaldo ^{**}

* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. COLOMBIA

** Universidad de Boyacá, Tunja. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 19/02/2018

Fecha de Aceptación: 06/06/2018

PAG 137-146

Abstract

The world has developed different methodologies for the design of asphalt mixtures; each of which is intended to optimise and find the optimal combination of materials that allow them to be resistant under specific travel, climate and structural support conditions. This article presents the results of an investigation which utilised coal tar as a binding agent for road surface mixtures and carried out a comparison of results of the physical and mechanical properties of sample bituminous mixtures produced by two distinct methodologies, Marshall and Ramcodes. Finally, an analysis was carried out on the suitability of tar as a binding agent and on utilising the Ramcodes methodology when designing mixtures.

Keywords: Coal tar, Marshall, Ramcodes, bituminous mixture

Resumen

En el mundo se han desarrollado diferentes metodologías para el diseño de mezclas asfálticas; cada una procura optimizar y encontrar la combinación óptima de materiales que permita ser resistente bajo unas condiciones determinadas de tránsito, clima y apoyo estructural. En este artículo se muestran los resultados de una investigación donde se utilizó el alquitrán de hulla como ligante en mezclas para pavimentos y se realiza una comparación de los resultados de las propiedades físicas y mecánicas de probetas con mezcla bituminosa elaboradas por dos metodologías distintas, la Marshall y la Ramcodes. Por último, se realiza el análisis de la conveniencia de utilizar el alquitrán como ligante y de utilizar la metodología Ramcodes para el diseño de mezclas.

Palabras clave: Alquitrán de hulla, Marshall, Ramcodes, mezcla bituminosa

1. Introducción

Desde el inicio de los tiempos, el ser humano se ha esforzado por desarrollar actividades que permitan la supervivencia y la evolución. En un principio, estas actividades se limitaban al consumo directo de recursos proporcionados por la naturaleza. Con el mejoramiento de las actividades industriales aumentó la presencia de residuos industriales que ya no eran soportables para el medio ambiente.

La construcción de caminos es una actividad que implica un consumo importante de recursos naturales, durante la cual la producción de mezclas bituminosas involucra el uso de grandes cantidades de agregados y asfalto que en su mayoría provienen de la explotación de canteras y de petróleo. Considerando las políticas de sostenibilidad, esta investigación tiene como objetivo contribuir al desarrollo del uso de subproductos de la industria del hierro y el acero.

Además, con comparaciones con la metodología Marshall, esta investigación tiene como objetivo analizar los beneficios de utilizar la metodología Ramcodes en el diseño de mezclas bituminosas y cuál de estas es la más utilizada en nuestro ambiente.

Con el fin de verificar los hallazgos previos, se realizó un análisis estadístico con ayuda del programa SPSS con los resultados obtenidos por ambas metodologías para determinar si difieren estos resultados y si es aconsejable el uso de esta metodología.

2. Materiales utilizados

2.1 Alquitrán como ligante

El alquitrán, como se muestra en la Figura 1, es un producto bituminoso semisólido o líquido que se obtiene como un residuo de la destilación en ausencia de aire, sustancias orgánicas que contienen materiales volátiles como carbón o madera. Es un ligante frío, resistente al agua, insoluble en aceites lubricantes y combustibles de petróleo, soluble en éter, benceno, disulfuro de carbón, cloroformo y quinoleína. El alquitrán se compone de componentes

¹ Autor Correspondencia:

Professor from the Transportation and Public Works Department and active Investigator for GRINFRAVIAL. Tunja, Colombia.
E-mail: ricardo.ochoa@uptc.edu.co



alifáticos y nafténicos que contienen hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

El alquitrán utilizado en este estudio se produjo en una Coquería de la empresa de hierro y acero Acerías Paz del

Río S.A., que llevó a cabo el proceso a 1000 °C (Gómez, 2002). En la Tabla 1 se muestra las propiedades fisicoquímicas de este material.



Figura 1. Alquitrán producido por Acerías Paz del Río S.A

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del alquitrán. Fuente: Departamento Laboratorio Acerías Paz del Río S.A., 2015

Parámetro	Unidad	Promedio
Humedad	%	7
Cenizas	%	0,10
Insoluble en Quinoleína	%	4
Insoluble en Tolueno	%	3
Valor calorífico	kcal/kg	8.900

2.2 Agregados

Los materiales utilizados en una mezcla bituminosa deben someterse a estudios rigurosos para establecer si su uso es posible. Para ello, dado que los agregados gruesos utilizan un tipo de grava triturada que fue sometida a las siguientes pruebas: erosión en la máquina de pruebas de abrasión de Los Ángeles, porcentaje de fracturas, tasa de extensión y tasa de aplanamiento.

Además, se realizaron pruebas para determinar la gravedad específica y el porcentaje de absorción. Se utilizó arena como agregado fino y se utilizó cemento Portland como polvo de relleno así como también granos de arena pasados a través de un tamiz #200, se determinaron sus gravedades específicas. Todas estas pruebas fueron realizadas considerando los estándares de pruebas para materiales viales establecidos por el Instituto Nacional de Vías, INVÍAS y la Asociación Americana de Ensayo de Materiales (del inglés American Society of Testing Materials, ASTM).

El tipo de mezcla seleccionada mientras se llevó a cabo este estudio fue una mezcla densa en calor de tipo 19 (MDC-19) según el Artículo 450-13, de las especificaciones generales de construcción de carreteras de INVÍAS (2013a).

3. Metodología

La metodología utilizada en el desarrollo de esta investigación se consideró en tres etapas: la primera fue realizar pruebas para conocer las características de los materiales utilizados en el diseño de las mezclas bituminosas, la segunda etapa se refiere a la realización de las pruebas necesarias para obtener la fórmula de trabajo de la mezcla bituminosa para la metodología Marshall modificada por la Universidad de Illinois, y para la metodología Ramcodes. La tercera etapa se refiere a la comparación de los resultados de ambas metodologías y el análisis de la ventaja de utilizar el alquitrán como ligante y la implementación de la metodología Ramcodes.

3.1 Método Marshall

El propósito de este método es determinar el contenido óptimo de ligante para una mezcla de agregados específica y proporcionar información sobre las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla bituminosa en caliente, de modo que sea posible establecer si se ajustan a los parámetros de densidades y vacío de contenido óptimo durante la construcción de la capa de pavimento.

El objetivo general del proceso de diseño implica determinar una combinación e intensidad económica de agregados y ligantes que produzcan una mezcla con suficiente ligante para garantizar un pavimento durable, una estabilidad adecuada para satisfacer las demandas del tráfico sin causar deformaciones o desplazamientos, un contenido de vacío lo suficientemente alto para permitir una ligera cantidad de compactación adicional bajo cargas pesadas, sin exudación ni pérdida de estabilidad y suficiente trabajabilidad para permitir una colocación eficiente sin segregación (Hosseinzadeh et al., 2016).

3.2 Método Ramcodes

El método Ramcodes (Ochoa-Díaz, 2013; Sánchez et al., 2002), sigla para Metodología Racional para el Análisis de Densificación y Resistencia de Geomateriales Compactados (del inglés RAational Methodology for COmpacted geomaterial's DENSification and Strength analysis) desarrollado por F.J. Sánchez-Leal, es una metodología basada en experimentos factoriales y la experiencia práctica en el diseño y control, para un análisis de la densificación y la resistencia de geomateriales compactados.

Marshall acelerado por Ramcodes es una aplicación desarrollada por el diseño rápido del procedimiento tradicional Marshall, que une racionalmente las especificaciones de diseño con los criterios de control de campo, implementando el "polígono de vacíos" que define un área que cumple con todas las especificaciones de vacío (VAM, VAF y VA) (Sánchez-Leal et al., 2011). Estos vacíos se basan en el contenido de ligante (%CA) y la densidad Bulk (Gmb) y se indican en los mapas como isóneas, para los valores permitidos, la intersección de estas líneas produce una construcción gráfica del espacio %CA – Gmb, que da como resultado un polígono en el que a través de su centroide, es matemáticamente posible obtener un contenido de asfalto que cumple con todas las especificaciones de vacío para la mezcla (Delgado et al., 2006).

Se han propuesto los siguientes pasos para modificar o acelerar el proceso de diseño original de Marshall (Sánchez-Leal, 2009):

- Determinar la gravedad específica efectiva (Gse), la gravedad de masa específica de una combinación de agregados (Gsb) y la gravedad aparente específica (Gsa) de la combinación de agregados seleccionados. Verificar que $Gsa > Gse > Gsb$, según las definiciones teóricas.
- Obtener matemáticamente, a partir del polígono de vacíos, el contenido óptimo de ligante, considerando las especificaciones y las gravedades específicas de la combinación de agregados.
- Siguiendo las normativas de pruebas de Marshall, mezclar la combinación de agregados con el contenido óptimo de ligante y condensar tres especímenes para determinar los vacíos y probarlos para determinar su estabilidad y flujo. Calcular el promedio de los resultados.
- Verificar si el promedio del contenido de ligante y la densidad Bulk entra en el polígono de vacíos. De no ser así, entonces el intento falló. Seleccionar otra combinación de agregados y volver al primer paso.
- Verificar si el promedio de estabilidad y flujo de los especímenes cumple con la especificación. De no ser así, entonces el intento falló. Seleccionar otra combinación de agregados y volver al primer paso.

4. Diseño experimental

La Tabla 2 muestra seis distribuciones granulométricas del material, con sus dosificaciones respectivas (Sánchez-Leal, 2007). Se ajustaron los tamaños de las partículas de modo que, en una banda de la mezcla de MDC 19, estas estuvieran exactamente en el centro, en la parte delgada y en la parte gruesa de esta banda, Figura 2, para evaluar el impacto del tamaño de las partículas en el comportamiento de la mezcla.

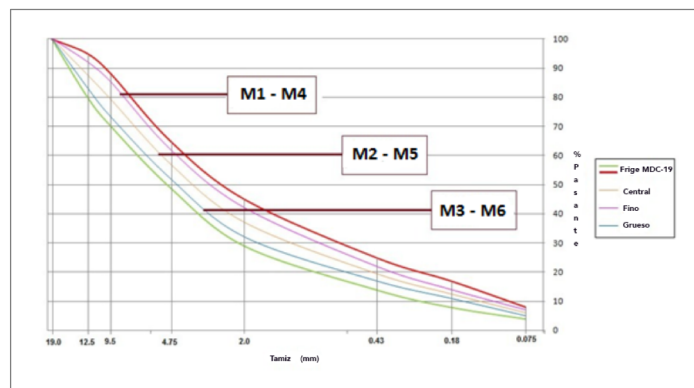


Figura 2. Distribución granulométrica de las mezclas



La variable es del tipo de polvo de relleno (cemento o arena), ajustada a la banda granulométrica de la mezcla. El proceso de pruebas de laboratorio para las metodologías Marshall y Ramcodes fue desarrollado en dos etapas:

En la primera etapa, se llevaron a cabo seis diseños Marshall para su desarrollo experimental, tres con cemento como relleno y tres con arena pasada por un tamiz #200. La temperatura de calentamiento de los agregados y el ligante era de 40 °C con una compactación constante de 75 golpes por cara (nivel de tránsito NT2) (INVIAS, 2013b) habiendo un experimento factorial que varió en dos factores, la variable del contenido de ligante en 0,5 % y la gradación variable según la posición en la banda granulométrica. Lo anterior, con el objetivo de encontrar la fórmula de trabajo para el diseño Marshall, seguido del proceso de compactación y los resultados del comportamiento mecánico de las mezclas.

En la segunda etapa, se desarrollaron seis Ramcodes (tamaños de partículas idénticos a los utilizados con Marshall), con porcentajes de ligante constantes para cada tamaño de partícula, con una compactación constante de 75 golpes por cara y una temperatura de mezclado de 40 °C. Estos porcentajes se obtuvieron de acuerdo al uso del programa RAMSOFT basado en la metodología Ramcodes, que generó la fórmula de trabajo (porcentaje óptimo de ligante) para cada mezcla, seguido por el proceso de compactación y los resultados de estabilidad y flujo de las mezclas. Luego de que las muestras fueron comprimidas, se dejaron enfriar por 15 minutos antes de sacarlas del molde. Una vez fuera del molde, se les permitió enfriarse y curarse a temperatura ambiente por ocho días, de modo que los solventes de las mezclas se evaporaran. Luego de esto, se siguió con la prueba para determinar la estabilidad y el flujo en el plan Marshall.

Tabla 2. Distribución de las partículas de la mezcla y tipo de agregado

Mezcla	Agregado	Material	Porcentaje	Distribución
M-1	Grueso	Grava	41	Parte fina de la banda granulométrica
	Fino	Arena	52	
	Relleno	Cemento	7	
M-2	Grueso	Grava	46	Centro de la banda granulométrica
	Fino	Arena	49	
	Relleno	Cemento	5	
M-3	Grueso	Grava	50	Parte gruesa de la banda granulométrica
	Fino	Arena	46	
	Relleno	Cemento	4	
M-4	Grueso	Grava	40	Parte fina de la banda granulométrica
	Fino	Arena	54	
	Relleno	Arena pasada por #200	6	
M-5	Grueso	Grava	44	Centro de la banda granulométrica
	Fino	Arena	51	
	Relleno	Arena pasada por #200	5	
M-6	Grueso	Grava	47	Parte gruesa de la banda granulométrica
	Fino	Arena	49	
	Relleno	Arena pasada por #200	4	

4.1 Resultados de las pruebas realizadas con ambas metodologías

La Tabla 3 y la Tabla 4 a continuación presentan los resultados obtenidos de las mezclas diseñadas por medio de ambas metodologías.

Con respecto a los resultados obtenidos y considerando las especificaciones de la Tabla 450.4 del artículo 450-07 de las especificaciones generales de construcción de carreteras, las mezclas preparadas con cemento Portland como relleno alcanzan un nivel de tránsito NT1. Sin embargo, el flujo está por encima del rango de 2-4 mm.

En los resultados observados de las mezclas preparadas con arena pasada por el tamiz #200 como relleno, algunos parámetros alcanzan las especificaciones para un nivel de tránsito NT1, aunque el flujo resultó de forma remota desde el rango especificado. Los resultados del Método Marshall para la Mezcla M-2 cumplen con todas las especificaciones para el nivel de tránsito NT2, para el cual este trabajo es la fórmula que mejor presenta el comportamiento mecánico.

Tabla 3. Resultados de las mezclas diseñadas con cemento como relleno

Mezclas diseñadas con grava, arena y cemento							
Parámetro	M-1		M-2		M-3		Requerimiento NT2
	Marshall	Ramcodes	Marshall	Ramcodes	Marshall	Ramcodes	
Bitumen (%)	7,40	7,13	6,50	6,87	6,42	6,63	-
Gmb (gr/cm ³)	2,13	2,14	2,14	2,13	2,13	2,13	-
Estabilidad (Kg)	734	793	792	755	668	688	>750
Flujo (mm)	4,13	4,03	3,88	4,13	4,26	4,22	2 - 4
Vv (%)	4,0	3,86	4,0	3,88	4,0	3,88	3 - 5
VAM (%)	16,37	15,78	15,22	15,80	15,53	15,81	> 15
VFA (%)	75,70	75,51	73,90	75,43	74,30	75,43	65 - 78

Tabla 4. Resultados de las mezclas diseñadas con arena como relleno

Mezclas diseñadas con grava, arena y arena pasada por un tamiz #200							
Parámetro	M-4		M-5		M-6		Requerimiento NT2
	Marshall	Ramcodes	Marshall	Ramcodes	Marshall	Ramcodes	
Bitumen (%)	6,60	6,80	6,60	6,70	6,20	6,70	-
Gmb (gr/cm ³)	2,18	2,18	2,17	2,17	2,18	2,17	-
Estabilidad (Kg)	527	472	702	643	665	588	>750
Flujo (mm)	8,0	10,1	9,2	10,0	8,6	9,8	2 - 4
Vv (%)	4,0	3,9	4,0	3,9	4,0	3,9	3 - 5
VAM (%)	15,6	15,8	15,8	15,8	15,0	15,8	> 15
VFA (%)	73,7	75,5	74,0	75,5	73,0	75,5	65 - 78

4.2 Análisis de sensibilidad para la mezcla M-2

Para esta mezcla, el estudio de sensibilidad se logró basándose en técnicas estadísticas del análisis de elementos factoriales según Ramcodes. Además, se estudió el comportamiento de los dos factores más influyentes en las mezclas bituminosas (G_{mb} y $\%P_b$). Este análisis tiene grandes ventajas en el control de mezclas compactas.

Además de los requisitos exigidos, la mezcla bituminosa tiene que alcanzar los requerimientos de las propiedades mecánicas tales como la estabilidad y el flujo. La representación gráfica de los valores de respuesta bajo G_{mb}

y $\%P_b$ genera un gráfico de contorno que es una imagen de la superficie de respuesta para cada parámetro mecánico seleccionado.

Las Ramcodes se basan en un experimento factorial de dos niveles, el contenido de ligante ($\%P_b$) y peso volumétrico específico (G_{mb}). El uso de mapas permite una visión de la variación de las propiedades mecánicas dentro del área en que se logran las especificaciones de espacio. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de la estabilidad, mientras que en la Figura 4 se demuestra el comportamiento del flujo. Esta mezcla tiene un desempeño alto o bajo dependiendo de donde se establezca el estatus.



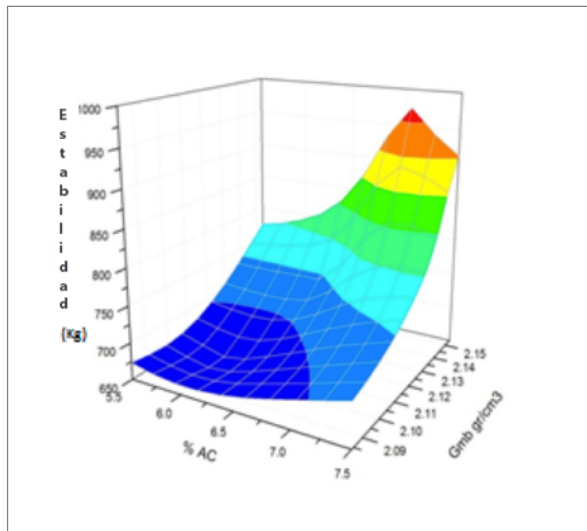


Figura 3. Comportamiento de la estabilidad

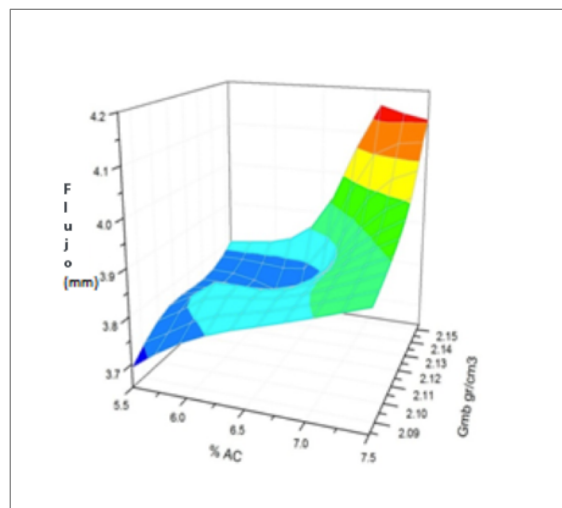


Figura 4. Comportamiento del flujo

4.3 Análisis estadístico

Con el fin de realizar la comparación de estabilidad en relación con las metodologías utilizadas, el diagrama de cajas de la Figura 5 se verificó inicialmente. Muestra una pequeña diferencia entre los valores de estabilidad y la variabilidad de datos similares.

Para confirmar si existe una diferencia significativa entre los resultados de estabilidad para ambas metodologías, es necesario para verificar la suposición de normalidad, cuyos resultados de la prueba de normalidad se muestran en la Tabla 5.

En un diagrama o gráfico Q-Q Normal, cada valor observado (Y_i) se compara con el puntaje típico NZ_i que teóricamente correspondía a ese valor en la distribución normal estandarizada. En el eje X, los valores observados son representados y ordenados de menor a mayor (estabilidad y flujo), en este orden, se representan las puntuaciones normales típicas (NZ_i). Cuando una muestra precede una

población normal, los puntos correspondientes para cada parte se agrupan alrededor de la diagonal representada en el diagrama. Las desviaciones en la diagonal indican desviaciones en la normalidad.

En la Figura 6 se muestra el diagrama Q-Q Normal para los datos establecidos y obtenidos por el Método Marshall. En la Figura 7 se presenta el diagrama Q-Q Normal para los datos establecidos y obtenidos por el método RAMCODES. La información anterior verifica que la distribución normal traza adecuadamente los datos de estabilidad por metodología.

Además, la prueba de Shapiro-Wilk de la Tabla 5 confirma este comportamiento con un nivel de fiabilidad del 95 % ($\alpha=0,05$)

Método Marshall: valor $p = 0,532 > 0,05$

Método RAMCODES: valor $p = 0,101 > 0,05$

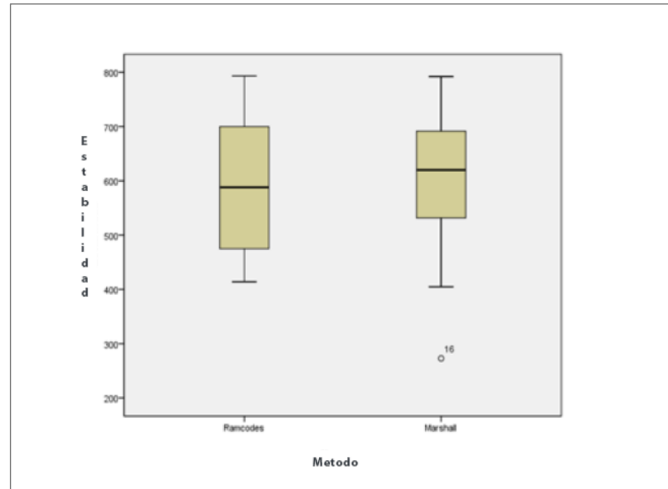


Figura 5. Diagrama de cajas con respecto a la estabilidad

Tabla 5. Resultados de la prueba de normalidad

	Método	Kolmogorov-smirnov ^a			Shapiro-wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Estabilidad	Ramcodes	0,228	15	0,034	0,902	15	0,101
	Marshall	0,144	15	0,200*	0,950	15	0,532

a. Corrección de la significación de Lilliefors

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera

Con esta información, la inferencia estadística se desarrolló relacionando la diferencia en el valor promedio de estabilidad para ambas metodologías. Los resultados obtenidos en el software SPSS para esta prueba se presentan en la Tabla 6.

Con el supuesto de varianzas iguales, estos resultados llevan a la conclusión de que no hay una diferencia significativa en los valores de estabilidad (valor $p = 0,856 > 0,05$). Esto significa que el uso de cualquier método no genera una diferencia significativa en los valores de estabilidad.

Para comparar el flujo en relación con ambas metodologías aplicadas, el diagrama de cajas en la Figura 8 se verifica inicialmente. En la Figura 8 se muestra un comportamiento similar para los datos del flujo para ambas metodologías.

Por medio de la prueba de Mann-Whitney (Tabla 7) para muestras independientes, se puede confirmar lo observado en la Figura 8.

Con respecto al nivel de fiabilidad de 95 %, valor $p = 0,299 > 0,05$, no se puede concluir ninguna diferencia significativa entre los valores del flujo utilizando cualquiera de las dos metodologías.



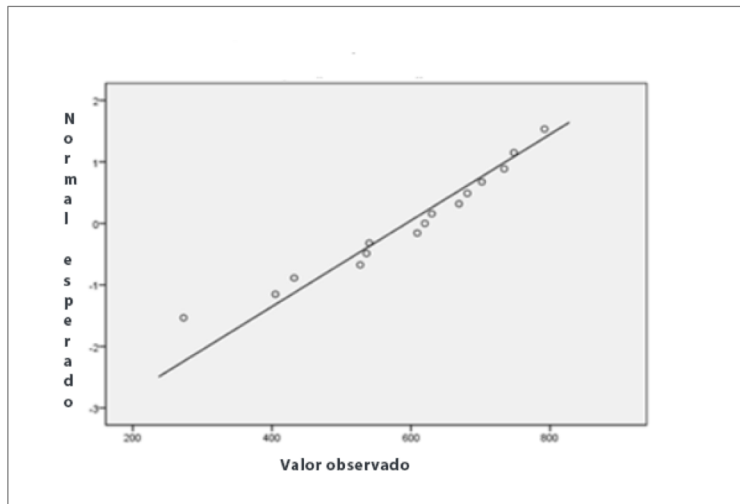


Figura 6. Diagrama Q-Q Normal, estabilidad con respecto al Método Marshall

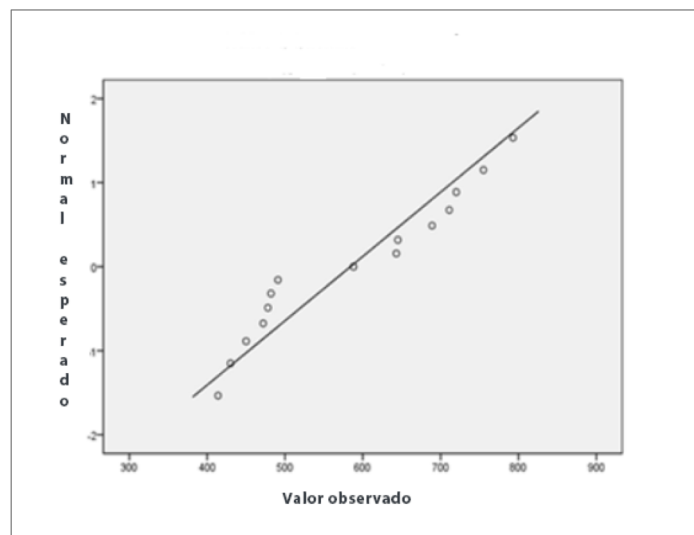


Figura 7. Diagrama Q-Q Normal, estabilidad con respecto al Método Ramcodes

Tabla 6. Resultados de pruebas de muestras independientes con respecto a la estabilidad

		Varianzas iguales de la prueba de levene		Prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Dif. en la media	Error Tip.	Intervalo al 95 % fiabilidad	
									Inferior	Superior
STB.	Varianzas iguales	0,018	0,894	-0,183	28	0,856	-9,133	49,978	-111,508	93,242
	Varianzas diferentes			-0,183		0,856	-9,133	49,978	-111,544	93,277

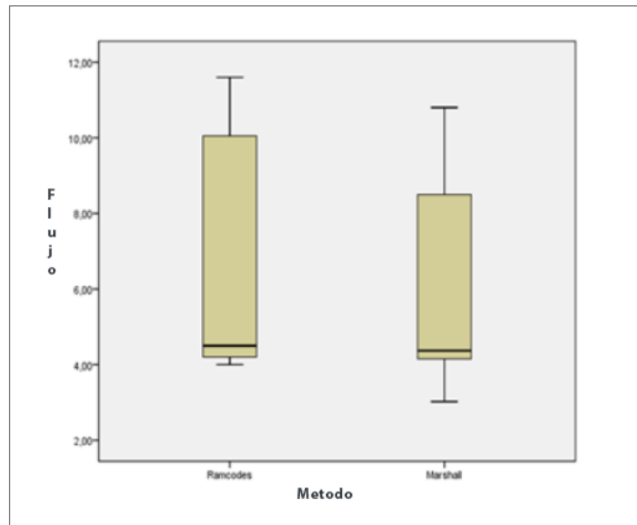


Figura 8. Diagrama de Cajas con respecto al flujo

Tabla 7. Resultados de la prueba de Mann-Whitney

Estadísticas de Contraste ^b	
	Flujo
U para Mann-Whitney	87,500
W para Wilcoxon	207,500
Z	-1,039
Significación asintótica (bilateral)	0,299
Significación exacta [2*(Significación unilateral)]	0,305 ^a

a. Sin correcciones para los nexos.

b. Variable grupal: Método

5. Conclusiones

No se pretende sustituir el asfalto para el pavimento en la preparación de mezclas. Al contrario, la intención es buscar alternativas que permitan la selección del producto que se ajuste a las necesidades de cada proyecto específico.

Ramcodes es una metodología de gran utilidad para el diseño, producción y control de calidad de mezclas bituminosas, siempre que garantice el cumplimiento de los parámetros volumétricos demandados por las especificaciones. Además, existen varios beneficios al utilizar esta metodología, ya que ahorra tiempo, recursos y dinero. Afortunadamente, sólo es necesario hacer tres briquetas en comparación con las 15 briquetas del Método Marshall.

Entre las observaciones inconsistentes en el desarrollo de esta investigación y teniendo presente el análisis

estadístico, se demostró que no hay diferencias significativas entre los resultados obtenidos con el Método Marshall y el Método Ramcodes, ya que el uso del Método Ramcodes es válido en el diseño de las mezclas bituminosas de pavimentos.

La mezcla que mejor presenta el comportamiento y que mejor se ajusta a los requerimientos técnicos de las normas del INVIAS fue la preparación con grava como agregado grueso, arena como agregado fino y cemento como relleno. Sin embargo, se debe continuar con esta investigación para encontrar la mejor manera de utilizar esta unión y por ende contribuir con el medioambiente.

Dada la susceptibilidad térmica del bitumen y, por lo tanto, de la mezcla de asfalto, se determina que este tipo de mezcla se puede utilizar en climas fríos a templados. Bajo estas condiciones, el comportamiento de la mezcla será



aceptable bajo la acción de las cargas impuestas por el tráfico.

Si algunas mezclas no cumplieron con los requerimientos del INVIAS, para la capa de uso de la

carretera, sería posible utilizarlas como una base mejorada o capas de subbase.

6. Referencias

- Delgado H., Garnica P., Villatoro G. M., Rodríguez G. (2006)**, Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica. Sanfandila, Querétaro. Retrieved from <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt299.pdf>
- Gómez A. (2002)**, Procesos siderúrgico – Planta Belencito, Acerías Paz del Río S.A. Belencito, Colombia, Tech. Rep., enero, 2002.
- Hosseinzadeh N., Rezaei M. J., Hosseini S. M. (2016)**, Investigation and performance improvement of hot mix asphalt concrete containing EAF slag. *International Journal of Engineering and Technology*, 8(4), 260–264. <https://doi.org/10.7763/IJET.2016.V8.895>
- INVIAS. (2013a)**, Artículo 450-13 Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua. Bogotá.
- INVIAS. (2013b)**, Normas para ensayos de materiales para carreteras. Bogotá.
- Ochoa-Díaz R. (2013)**, Analysis of the use of coal tar as a binder in bituminous mixtures, using Marshall and Ramcodes methodologies. *Journal of Physics: Conference Series*, 466(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/466/1/012034>
- Sánchez-Leal F. J. (2007)**, Gradation Chart for Asphalt Mixes : Development. *Journal of Materials in Civil Engineering in Civil Engineering*, 19(2), 185–197. <https://doi.org/10.1061/ASCE?0899-1561?2007?19:2?185?>
- Sánchez-Leal F. J. (2009)**, Manual de Aplicación - Metodología de Análisis y Diseño de Geomateriales Compactados. (Ramcodes, Ed.).
- Sánchez-Leal F. J., Anguas P. G., Larreal M., Valdés D. B. L. (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).
- Sánchez F., Garnica P., Gómez J., Pérez N. (2002)**, Ramcodes: Metodología racional para el análisis de densificación de geomateriales compactados.200. Sanfandila, Querétaro. Retrieved from <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt200.pdf>