

Síntesis Tesis Maestría en Construcción

F-02 v- 2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Facultad de Artes

MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN



Título: Diseño alternativo para concreto asfáltico modificado con polímeros plásticos reciclados provenientes de envases de alimentos y elementos de aseo aplicando la metodología de superficies de respuesta

Autor: Ing. Civil Omar Wladimir Sánchez León

Director Tesis: PhD. MSc. Ing. Civil Ferney Betancourt Cardozo

30 Noviembre 2022

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación por residuos sólidos resultantes del uso de envases de plástico afecta de manera crítica muchos ecosistemas actualmente y en consecuencia, el reciclaje y el aprovechamiento de estos materiales en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentación, contribuye en parte al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) trazados por la asamblea general de las Naciones Unidas, en relación con la adopción de medidas urgentes para combatir el cambio climático (ODS No. 13), el avance para disponer de agua limpia mediante gestión sostenible (ODS No. 6), la promoción para una industrialización sostenible (ODS No. 9) y la garantía de la salud y el bienestar para todos(as) (ODS No. 3). En aras de contribuir con estos objetivos, en este trabajo se planteó el empleo de plásticos reciclados de un solo uso (envases de alimentos y elementos de aseo), tales como los polímeros de tereftalato de polietileno (PET), polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (PEAD), para ser incorporados adecuadamente en mezclas asfálticas producidas en caliente, tal que sirvan para la pavimentación en obras viales, mediante la utilización de la metodología de superficies de respuesta (MSR) como herramienta estadística de análisis y de la validación de los resultados, con el empleo del método de diseño Marshall y las especificaciones generales para la construcción de carreteras INVIAS 2013 correspondientes. Como resultado de este trabajo de investigación, se determinaron las regiones óptimas para los tres tipos de polímero, en términos de los contenidos óptimos de cemento asfáltico, las cantidades de grano de polímero reciclado provenientes de envases plásticos reciclados y las respectivas fórmulas de trabajo de las mezclas asfálticas para las condiciones óptimas. Los resultados experimentales mostraron que el comportamiento de los concretos asfálticos modificados con el grano de polímero reciclado de PET, PP y PEAD resultan aptos para la construcción de pavimentos peatonales y vehiculares, y por consiguiente, pueden favorecer el medio ambiente, dado que su reciclaje reduce la contaminación ambiental en las fuentes hídricas y rellenos sanitarios, y en general puede contribuir a la salud y el bienestar de todos(as).

2. PROBLEMÁTICA

La acumulación de residuos plásticos de un solo uso que debido a su difícil degradación ocasiona una preocupante situación a los habitantes que sufren los estragos de la contaminación del medio ambiente que se genera mayormente en ciudades densamente pobladas como Bogotá, donde se exceden las capacidades de recolección y reciclaje más cuando las políticas públicas de reciclaje no son suficientes dado que la cantidad de residuos plásticos aumenta de manera desbordada, tal como lo evidencia las estadísticas de la Unidad de Servicios Públicos de Bogotá sobre la generación de desechos plásticos de un solo uso (las bolsas plásticas, PEAD y PEBD, y envases fabricados, PET y PP), los cuales pasaron de alrededor de 200 toneladas diarias en el año 2012 (UAESP, 2012) y al cabo de seis años, estos materiales llegaron a 1170 toneladas diarias (UAESP, 2018).

3. FORMULACIÓN

En este proyecto, el diseño de la mezcla asfáltica modificada con el grano de polímero reciclado (GPR) busca la determinación los contenidos óptimos de asfalto y de GPR, así como la fórmula de trabajo de la mezcla, a nivel de diseño preliminar, se toma como referencia el método de diseño Marshall, el método oficial para el diseño de mezclas asfálticas aceptado en Colombia. Para lo anterior, se elaboran especímenes de ensayo en laboratorio para determinar la mezcla de concreto definida como óptima por el método Marshall (a modo de validación) y por la metodología de superficies de respuesta (MSR) empleando una misma base de datos experimental. La optimización propone emplear la metodología de superficies de respuesta (MSR) como método alternativo de diseño. De este modo, las mezclas asfálticas modificadas con polímeros reciclados, PET, PP y PEAD, se analizan con respecto a los criterios del diseño preliminar de mezclas asfálticas, a partir de caracterizaciones físico-mecánicas básicas del diseño Marshall, establecidos en las especificaciones

generales para la construcción de carreteras en lo relacionado con las mezclas asfálticas densas producidas en caliente (Tabla 450-10, Artículo 450 -13, INVIAS 2013).

4. JUSTIFICACIÓN

La asamblea general de las Naciones Unidas se trazó diecisiete objetivos de desarrollo sostenible para proteger el planeta contra la degradación mediante el consumo y la protección sostenible. Estos objetivos pretenden llevar a los países hacia la gestión sostenible de sus recursos naturales y la toma de medidas para hacer frente al cambio climático, de manera que sea posible elevar la calidad de vida y garantizar la satisfacción de las necesidades de las generaciones presentes y futuras (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015). Los objetivos de desarrollo sostenible buscan que los ecosistemas tengan la oportunidad regenerarse por sí solos, pero esta tarea se está viendo imposible de cumplir si las sociedades no reducen la producción de objetos no biodegradables convertidos en residuos y no se reutiliza los productos para darles un segundo ciclo de vida mediante la transformación en productos diferentes y si no se crean operaciones de recolección y tratamiento de los residuos para reintroducirlos en la vida productiva a estos materiales. El cuidado del medio ambiente ha llevado a las sociedades a buscar alternativas, establecer medidas y acciones directas tendientes a incrementar la reutilización y el aprovechamiento de los residuos plásticos de un solo que produce el hombre como una obligación ambiental con el planeta. Han surgido soluciones como la economía circular fundamentada en el reciclaje y la reutilización de materiales para extenderles la vida útil o la opción de repotenciar los objetos usados para efectuar reparaciones de lo existente y realizar mejoras en el desempeño de los materiales llevando a aprovechar todo al máximo para llegar a la meta de no generar ningún residuo y no producir nuevos materiales (Guan, Ling, Han, Yang, & Yu, 2020) (Agency, 2020)(Ceurstemont & Magazine, 2020). Como objetivos de desarrollo sostenible se busca que las infraestructuras sean resilientes adaptadas y resistentes al cambio climático, por lo que emplear materiales alternativos como el GPR obtenido de envases fabricados en PET, PP y PEAD de un solo uso promueven nuevas tecnologías y técnicas de diseño para producir mezclas asfálticas más duraderas y sostenibles que tengan consumos óptimos de agregados pétreos, cemento asfáltico y el GPR dentro un balance ecológico.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar concretos asfálticos modificados empleando el grano de polímero reciclado proveniente de envases de alimentos y elementos de aseo tales como el tereftalato de polietileno, el polipropileno y el polietileno de alta densidad mediante la aplicación de la metodología de superficies de respuesta.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar física y mecánicamente los concretos asfálticos, mediante el diseño Marshall, con y sin la adición del grano de polímero reciclado.

Caracterización física y mecánica de materiales para el diseño de mezclas asfálticas modificadas con el GPR por el diseño Marshall y la optimización con la metodología de superficies de respuesta.

Realizar la optimización del grano de polímero reciclado incorporado en el concreto asfáltico modificado del tipo MDC-19 bajo la metodología de superficies de respuesta.

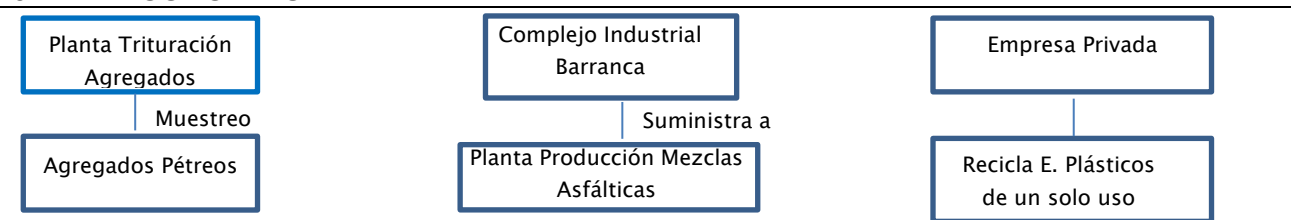
5. ALCANCES Y LIMITACIONES

La utilización del método de diseño Marshall para el diseño de mezclas asfálticas modificadas con GPR se emplea como medio para validar el diseño con los criterios de diseño de la norma.

La base de datos experimental obtenida de los ensayos del diseño Marshall se empleó para insumo de la formulación de la metodología de superficies de respuesta MSR a fin de determinar los contenidos óptimos de cemento asfáltico y GPR.

Se emplea el diseño Marshall evaluando el análisis volumétrico y los parámetros de estabilidad y flujo en fase preliminar sin pruebas de desempeño sobre las mezclas asfálticas modificadas con GPR

6. MAPA CONCEPTUAL Y PLAN EXPERIMENTAL



MAPA CONCEPTUAL Y PLAN EXPERIMENTAL

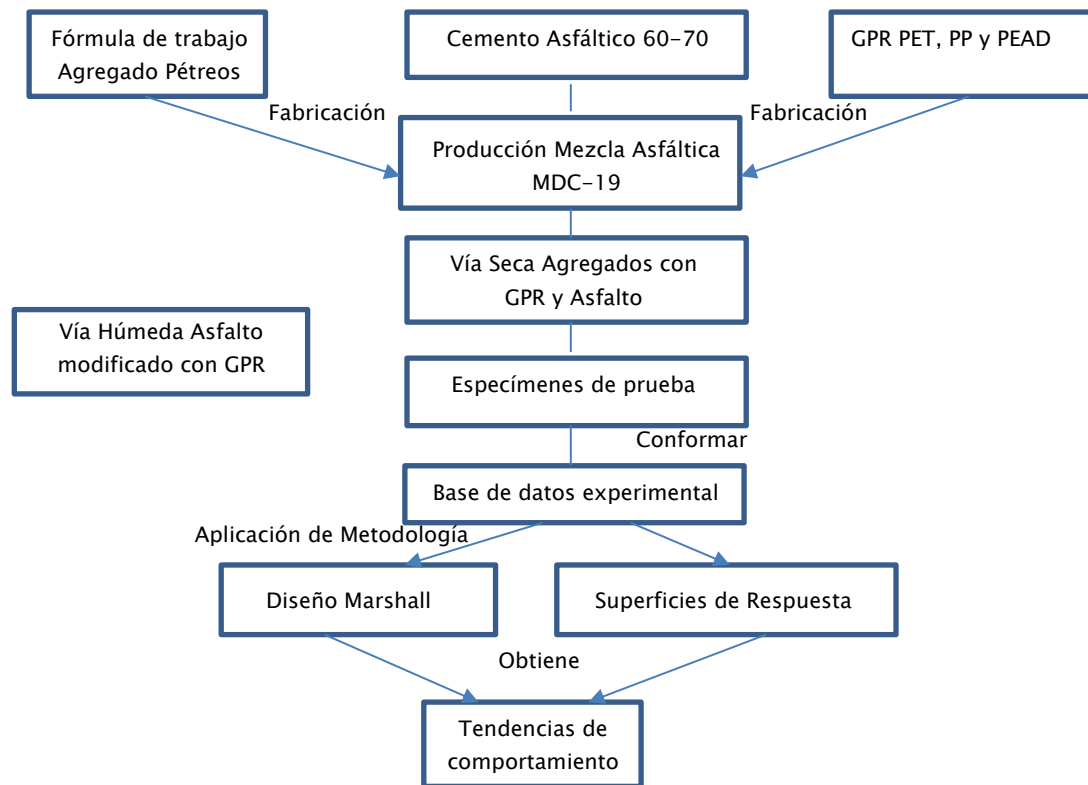


Tabla A-1 Resumen del plan experimental conjunto – Diseño Marshall y Metodología de Superficies de Respuesta, MSR

Polímero, GPR	Condiciones para diseño de la mezcla asfáltica MDC-19	Briquetas Compactadas según criterio Marshall	Mezcla Suelta - Gravedades específica máxima de la MAM
	Sin Polímeros	15	5
PET	4%, 10, 16	15, 15, 15	5, 5, 5
PP	4%, 10%, 16	15, 15, 15	5, 5, 5
PEAD	4%, 10%, 16%	15, 15, 15	5, 5, 5
PET	PET al 7.5%	4	1
PP	PP al 7.5%	4	1
PEAD	PEAD al 7.5%	4	1
	Mezclas fabricadas	162	53

Fuente: propia

7. POLIMEROS DE UN SOLO USO Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL

Los problemas de contaminación por residuos plásticos que afectan la fauna y hasta el propio hombre deben generar una conciencia ambiental por lo que debe replantearse el uso excesivo de estos materiales para disminuir su consumo ó mediante la creación de nuevas tecnologías que analicen el ciclo de vida de los plásticos haciendo una trazabilidad hasta su destino final buscando alternativas sostenibles como el reaprovechamiento de estos residuos plásticos mediante el tratamiento que permita el reciclaje para que los productos que se fabriquen conserven, protejan y busquen recuperar los recursos naturales para no superar la tasa de desarrollo de sus sustitutos renovables y las emisiones de efecto invernadero para que no se rebase la capacidad de asimilación del ambiente (Ripoll y Farré, 2008).

8. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Los agregados pétreos empleados para la fabricación de las mezclas asfálticas provienen del proceso de trituración de rocas extraídas de río y de cantera, fueron extraídos del Río Guayuriba ubicado en el departamento del Meta y de la cantera con macizos rocosos donde funciona la planta de la empresa CTU S.A.

El cemento asfáltico empleado en la investigación provino del Centro Industrial de Barrancabermeja de grado de penetración 60-70, se realizó muestreo en la planta de producción para mediante ensayos de caracterización determinar el grado de penetración entregado por el productor, el punto de ablandamiento, la viscosidad y la ductilidad del material.

Los polímeros termoplásticos empleados en esta investigación se seleccionaron porque son los más usados y que generan una problemática de acumulación de residuos sólidos en Bogotá, estos materiales pueden ser reciclados y transformados en el grano de polímero reciclado (GPR) porque permiten ser triturados, moldeados por calentamiento manteniendo sus características de ductilidad y alta resistencia química.

9. RESULTADOS CARACTERIZACIÓN MATERIALES

Los agregados pétreos se definieron de acuerdo con la especificación granulométrica requerida para una capa de rodadura con granulometría tipo MDC-19 conforme con la especificación para Mezclas Asfálticas Densas en Caliente artículo 450 INVIAS 2013 se **desarrolló la fórmula de trabajo** para la combinación óptima de los **cuatro tipos de agregado pétreo** de arena y triturado

Análisis de resultados se muestran en la tabla A-2 para el agregado pétreo muestra estar compuesto por un 83 % de agregados de río entre arenas y triturado para garantizar una adecuada densidad dentro de la mezcla asfáltica el 17 % corresponde a arena triturada de cantera aportando una suficiente resistencia frente a las cargas.

Tabla A-2 Resultados de la caracterización de agregados pétreos

Parámetro medido	Pétreos Ideales para la producción de mezclas asfálticas en caliente
Dureza	Alta dureza y durabilidad mostrados en resultados bajo de desgaste en Maquina de los Angeles Bajo deterioro en Microdeval y resistencia por el 10% finos
Durabilidad	Poca pérdida de solidez
Limpieza	Limpieza ideal por nulo índice de plasticidad Alto Equivalente de Arena y bajo valor de azul de metileno
Geometría de las partículas	Trituración muy buena índices de fracturamiento mecánico
Absorción y gravedad	Forma equidimensional de los granos en la matriz de la mezcla Gravedad específica alta y baja absorción

El cemento asfáltico fue sometido a ensayos de caracterización de acuerdo a las normas de ensayo INVIAS se muestran en la tabla A-3:

Tabla A-3 Resultados de la caracterización del cemento asfáltico

Característica	Norma de ensayo INV 2013	Valor medido	Especificación Art. 410-13 INV Penetración 60 - 70	
Asfalto original			Mín.	Máx.
Penetración (25°C, 100 g, 5 seg), 0.1 mm	E-706	66.0	60	70
Punto de ablandamiento, °C	E-712	48.1	48	54
Ductibilidad (25°C, 5 cm/min), cm	E-702	143	100	
Viscosidad a 60.1°C, Pa.s	E-717	223.0	150	
Viscosidad a 100°C, Pa.s		3.0		
Viscosidad a 135°C, Pa.s		0.36		
Viscosidad a 160°C, Pa.s		0.11		

El GPR fue sometido a ensayos de espectroscopia infrarroja – FTIR, para la identificación molecular de cada uno de los materiales alternativos a emplear en la fabricación de las mezclas asfálticas modificadas como el PET, el PP y el PEAD.

La tesis efectuó caracterización de todos los materiales empleados en la investigación, como de los productos obtenidos con los diseños de mezcla asfáltica determinados por el método Marshall mediante el análisis volumétrico y los ensayos de Flujo - Estabilidad para la mezcla patrón y las mezclas asfálticas modificadas con GPR de PET, PP y PEAD.

Se elaboraron especímenes compactos y sueltos, la mezcla suelta fue empleada para determinar la gravedad específica máxima en laboratorio con ayuda del picnómetro al vacío con este parámetro se calcula la información volumétrica de la mezcla asfáltica como el porcentaje de vacíos con aire y el asfalto absorbido dentro del agregado pétreo.

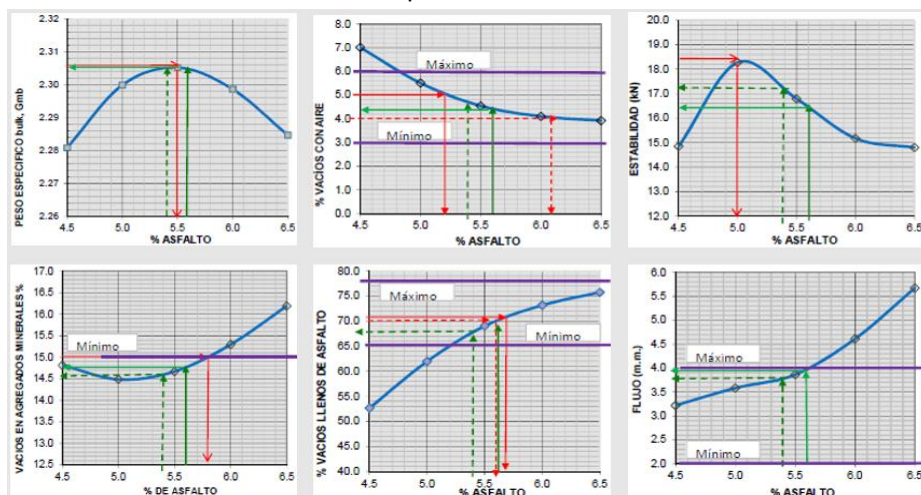
10. LINEAMIENTOS DISEÑO MARSHALL – DISEÑO METODOLOGÍA MSR

Se analizó la relación de fases para la mezcla asfáltica patrón para determinar las ecuaciones de la relación de fases con la mezcla asfáltica modificada con el GPR a fin de obtener la **gravedad específica Bulk** del

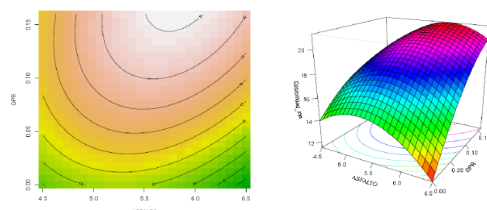
agregado combinado junto con los polímeros en la briqueta compactada, debido a que se **ve afectada la absorción de agua y asfalto** en la mezcla asfáltica.

El diseño Marshall emplea **gráficas en dos dimensiones donde se valora el contenido de cemento asfáltico contra las siete propiedades** características de la mezcla o criterios de diseño. El diseño busca **determinar el contenido óptimo de cemento asfáltico** para lograr un pavimento durable. El diseño Marshall para la condición con GPR de PP al 4% respecto al contenido de cemento asfáltico se muestra en la tabla A-4 con las gráficas de diseño, a modo de ejemplo de los diseños Marshall de las mezclas asfálticas..

Tabla A-4 Resultados del diseño Marshall para la condición con GPR de PP al 4% del contenido de asfalto



La metodología de superficies de respuesta, MSR, **usa los datos del método Marshall para la obtención de los contenidos óptimos de cemento asfáltico y del GPR** mediante la aplicación de técnicas estadísticas y soluciones gráficas en tres dimensiones. La combinación de los resultados se emplea para elaborar las gráficas de contorno como se muestra en la ilustración A-1, para una de las propiedades incluidas en el diseño Marshall, a modo de ejemplo de las evaluaciones realizadas por medio de la MSR.



Fuente: Propia

La solución de optimización por MSR consiste en buscar la región de diseño que satisface los criterios mediante la superposición de las siete (7) graficas de contorno de las propiedades Gsb, VA, VAM, VFA, Estabilidad (E, resistencia), Flujo (F, deformación) y rigidez (relación E/F).

CRITERIOS DISEÑO - RESPUESTAS			MARSHALL		MSR	
Parámetros	Compactación	Golpes/Cara = 75	NT2	NT3	NT2	NT3
VA %	Vacíos con aire		3-5	4-6	3-5	4-6
VAM	Vacíos en agregados minerales		15	15	15	15
VFB	Vacíos llenos de asfalto		65-78	66-75	65-78	66-75
GSB	Gravedad específica de la mezcla asfáltica compactada		Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
ESTABILIDAD	Resistencia a la capacidad de carga		7500	9000	7500	9000
FLUJO	Deformación diametral		2-4	2-3.5	2-4	2-3.5
ESTAB/FLUJO	Relación Estabilidad - Flujo		3-5	3-6	3-5	3-6
% ASFALTO	Porcentaje óptimo de cemento asfáltico		Variable		Variable	
% GPR	Porcentaje óptimo de grano de polímero reciclado (PET, PP y PEAD)		Constante un diseño por cada GPR		Variable	

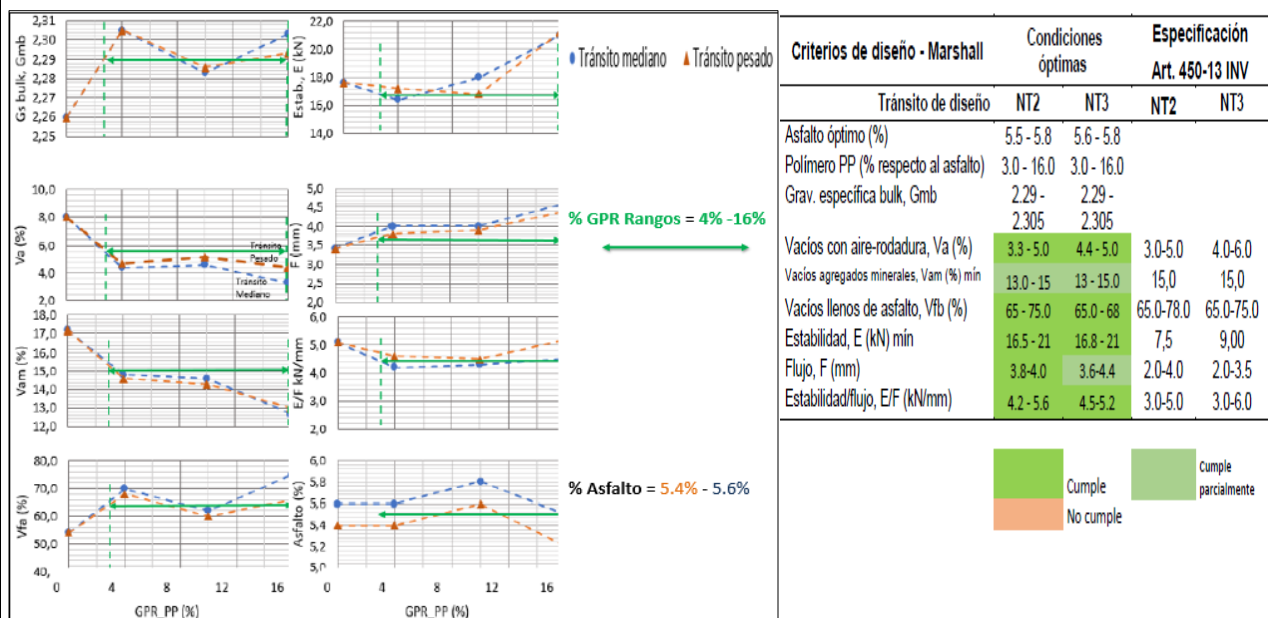
El lenguaje de programación “R” se empleó para el análisis de los efectos de las dos variables numéricas independientes “Asfalto” y “GPR” basándose sobre los datos obtenidos en laboratorio del diseño Marshall y teniendo en cuenta los siguientes parámetros realizados en los ensayos experimentales:

- Incrementos de 0.5 % en el contenido de cemento asfáltico
- Incrementos en el contenido de GPR (PP, PET y PEAD) 4%, 7.5%, 10% y 16% en función del contenido de asfalto
- Se determinan los coeficientes del modelo mediante los cálculos estadísticos mediante el Método de mínimos cuadrados se utiliza para calcular la recta de regresión lineal que minimiza los residuos, esto es, las diferencias entre los valores reales y los estimados por la recta.
- Calcula el Anova (análisis de varianza) para verificar interacción entre respuestas y las variables independientes comparación las medias centrales
- Determinar los puntos de curvatura mediante los puntos estacionarios (máximos y mínimos del modelo polinomial
- El análisis de varianza para verificar la interacción entre las respuestas y las variables independientes del modelo polinomial.

11. RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Resultados Método Marshall GPR – PP - Optimización

Diseño basado en VA: Vacíos con aire criterio predominante para los demás parámetros a partir de los resultados obtenidos se establece el porcentaje de los rangos de grano de polímero reciclado –GPR en los cuatro niveles de variación que se manejó para el diseño experimental 4%, 7.5%, 10% y 16% en los cuadros de análisis se muestran el resumen de cuatro diseños Marshall



Resultados Metodología de Superficies de Respuesta GPR – PP - Optimización

En el “Lenguaje R” se analizó los efectos de las dos variables numéricas independientes “Asfalto” y “GPR” basándose en la misma base de datos experimental obtenida en laboratorio para elaborar el diseño Marshall.

A modo de ejemplo del proceso de aplicación de la MSR, se ilustra una de las respuestas o propiedades Marshall empleadas para la optimización. La respuesta VAM (Vacíos en Agregados Minerales) con GPR de PP dosificado al 4% de Asfalto, se indica a continuación:

$$VAM_{PP} = 47.55 - 14.48A + 115.43B - 12.71AB + 1.48A^2 - 293.58B^2$$

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	47.55008	18.49402	2.5711	0.01322 *
ASFALTO	-14.48448	6.71549	-2.1569	0.03595 *
GPR	115.43028	50.49108	2.2862	0.02661 *
ASFALTO:GPR	-12.71498	8.03660	-1.5821	0.12005
ASFALTO^2	1.48745	0.60775	2.4475	0.01802 *
GPR^2	-293.58051	143.90783	-2.0401	0.04675 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

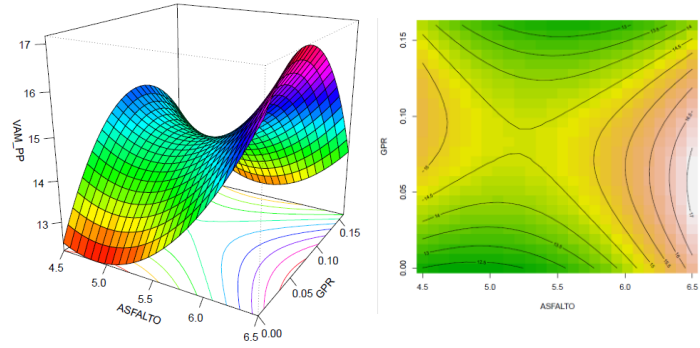
Multiple R-squared: 0.2662, Adjusted R-squared: 0.1913
F-statistic: 3.555 on 5 and 49 DF, p-value: 0.008042

Analysis of Variance Table

Response: VAM_PP	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
FO(ASFALTO, GPR)	2	19.864	9.9321	2.9704	0.06058
TWI(ASFALTO, GPR)	1	9.179	9.1785	2.7450	0.10395
PO(ASFALTO, GPR)	2	30.389	15.1944	4.5442	0.01547
Residuals	49	163.840	3.3437		
Lack of fit	9	56.180	6.2422	3.3192	0.03310
Pure error	40	107.660	2.6915		

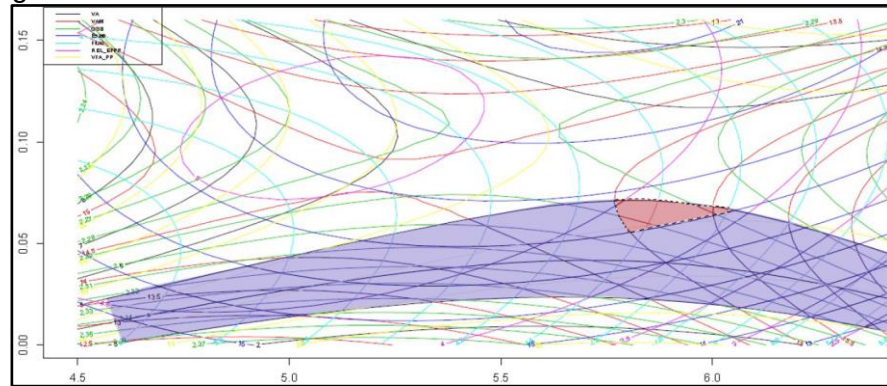
Stationary point of response surface:

ASFALTO	GPR
5.22548758	0.08343253



La región de diseño que cumple con todos los criterios de la especificación general para la construcción de carreteras, INV Art. 450-13, en términos del asfalto y del polímero, se resaltan en la figura:

Asfalto 5.8% - 6%
GPR PP 4% - 8%



12, RESPUESTAS MÉTODO MARSHALL Y METODOLOGIA SUPERFICIE RESPUESTA

El método Marshall concebido para el diseño de mezclas asfálticas no modificadas, al emplearse en un nuevo enfoque requiere un mayor volumen de información para determinar la optimización de GPR y Cemento Asfáltico. La MSR entrega mayor nivel de restricciones en la optimización:

Mezcla asfáltica modificada con GPR (%) de	Diseño Marshall	Metodología superficies de respuesta
PET	5.4% < Asfalto < 5.5%	5.1% < Asfalto < 5.5%
	3% < GPR < 12%	8.0% < GPR < 13%
PP	5.5% < Asfalto < 5.8%	5.8% < Asfalto < 6.0%
	3.0% < GPR < 16.0%	4.0% < GPR < 8.0%
PEAD	5.5% < Asfalto < 5.8%	5.0% < Asfalto < 5.2%
	3.0% < GPR < 16.0%	7% < GPR < 10%

CONCLUSIONES

- La alternativa de reutilizar empaques y envases de plástico de un solo uso en la fabricación de mezclas asfálticas es una posibilidad para aportar al cumplimiento de algunos de los objetivos de desarrollo sostenible, ODS, porque reduce el impacto ambiental que se ocasiona por la acumulación de plásticos y la contaminación de los ecosistemas.
- Las mezclas modificadas con GPR (PET, PP y PEAD) mejoran las condiciones volumétricas y la resistencia de las mezclas asfálticas, al menos en términos preliminares, para ser empleadas en la construcción de capas de rodadura para pavimentos.

- Las mezclas asfálticas modificadas permiten un consumo de GPR, PET, PP y PEAD, que va entre el 4% y el 13% con respecto al contenido de cemento asfáltico en la mezcla.
- El contenido de cemento asfáltico en la mezcla asfáltica modificada para todos los casos estudiados va desde 5.1% a 6.0%, siendo un buen indicador de factibilidad técnica, económica y de valiosa importancia ambiental para la producción de este material alternativo de construcción para su empleo en las capas de rodaduras de calles y carreteras
- La MSR es una valiosa herramienta estadística que permite resultados de mayor precisión para la optimización de mezclas modificadas con GPR.

RECOMENDACIONES

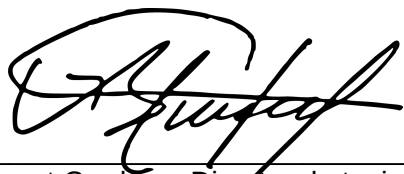
- La investigación puede ofrecer una referencia para corroborar los resultados del diseño Marshall. La optimización por la MSR para el GPR y Asfalto requiere el desarrollo de una investigación que explore las fórmulas de trabajo al desarrollo de pruebas de desempeño para complementar los resultados obtenidos de esta investigación y evalúe su desempeño para su implementación en planta de producción de mezclas asfálticas.
- La realización de pruebas de desempeño en las dosis determinadas de la optimización para GPR y asfalto amplían el espectro del comportamiento en servicio de las mezclas modificadas para las carpetas de rodadura obteniendo recomendaciones adicionales al diseño.
- Se pueden elaborar prototipos de tramos de prueba instalada con mezcla asfáltica modificada para evaluar el comportamiento del desempeño a través del tiempo y validar los beneficios aportados teniendo en cuenta las proyecciones de cantidades de GPR y de asfalto obtenidos en esta investigación.

BIBLIOGRAFIA

Año	Autores	Tema
2015	Baghaee Moghaddam, T. , Soltani, M. , Karim, MR , Baaj, H.	Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology
2017	Azahar, Jaya, Hainin, Bujang, M., Ngadi, N.	Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil
	Golchin, B., Hamzah, Hasan	Optimization in producing warm mix asphalt with polymer modified binder and surfactant-wax additive
2018	Wang, W., Cheng, Y., Tan, G.	Design Optimization of SBS-modified asphalt mixture reinforced with eco-friendly basalt fiber based on response surface methodology
2019	Yildirim, Z.B., Karacasu, M.	Modelling of waste rubber and glass fiber with response surface method in hot mix asphalt
	Choudhary, R., Kumar, A., Rahman, G.	Rheological and mechanical properties of bauxite residue as hot mix asphalt filler
	Cheng, Y., Chai, C., Zhang, Y., Chen, Y., Zhu, B.	A new eco-friendly porous asphalt mixture modified by crumb rubber and basalt fiber
	Kofteci, S., Masbah, A.K., Firat, M.Z., Gurcan, T.	Prediction of the Asphalt Mixture Performance Prepared with Recycled Fine Aggregate by using Response Surface Analysis
2020	Banyhussan, QS, Qasim, GJ, Al-Dahawi, AM, Jabar, YH	Prediction of fracture parameters for asphalt mixtures using semi-circular bending test
2022	Zanjirani, Palassi & Sadeghpour	Using response surface methodology to optimize rubber and LDPE contents in bitumen at low-temperature performance
	Rawand, Zainab, Muslich & Maan	Investigating the rheological properties of asphalt binder incorporating different crumb rubber contents based on a response surface methodology
	Moghaddam Baghaee T, Baaj H	Effects of Aggregate Shape Parameters and Gradation on High-Modulus Asphalt Mix Performance

Fuente: Scopus (2022).

Visto bueno:



Ferney Betancourt Cardozo, Director de tesis